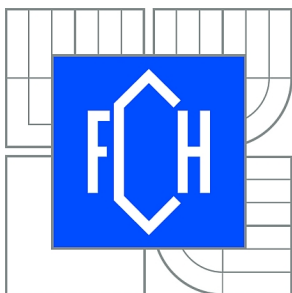




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ
FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

ELEKTRICKÉ TRANSPORTNÍ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ PRO ORGANICKOU ELEKTRONIKU

ELECTRICAL TRANSPORT PROPERTIES OF MATERIALS FOR ORGANIC ELECTRONICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. STANISLAV STŘÍTESKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Mgr. RADEK PŘIKRYL, Ph.D.

BRNO 2012



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta chemická
Purkyňova 464/118, 61200 Brno 12

Zadání diplomové práce

| | | |
|------------------------|---|----------------------------------|
| Číslo diplomové práce: | FCH-DIP0643/2011 | Akademický rok: 2011/2012 |
| Ústav: | Ústav chemie materiálů | |
| Student(ka): | Bc. Stanislav Stříteský | |
| Studijní program: | Chemie, technologie a vlastnosti materiálů (N2820) | |
| Studijní obor: | Chemie, technologie a vlastnosti materiálů (2808T016) | |
| Vedoucí práce | Mgr. Radek Přikryl, Ph.D. | |
| Konzultanti: | | |

Název diplomové práce:

Elektrické transportní vlastnosti materiálů pro organickou elektroniku

Zadání diplomové práce:

Optimalizace procesu a podmínek charakterizace FET struktur, automatizace systému pro měření charakteristik FET struktur v prostředí LabView, charakterizace transportních vlastností určením pohyblivosti nosičů náboje na strukturách připravených na bázi derivátů DPP

Termín odevzdání diplomové práce: 11.5.2012

Diplomová práce se odevzdává ve třech exemplářích na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu diplomové práce. Toto zadání je přílohou diplomové práce.

Bc. Stanislav Stříteský
Student(ka)

Mgr. Radek Přikryl, Ph.D.
Vedoucí práce

prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.
Ředitel ústavu

V Brně, dne 15.1.2012

prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na návrh a realizaci automatizovaného systému pro charakterizaci organických FET struktur na bázi derivátů DPP a následně optimalizaci podmínek charakterizačního procesu. V rámci řešení této práce byl v prostředí LabVIEW vytvořen program „MeasFET“, který řídí hardwarové prvky systému sestaveného v loňském roce. Dále byly provedeny prvotní testy pro optimalizaci procesu měření pohyblivosti nosičů náboje v derivátech DPP.

ABSTRACT

My master thesis is focused on design and realization fully automated system which will be used for the characterization of the organic FET structure, based on DPP derivatives with follow optimization of the characterization process. Program „MeasFET“ has been created at the LabVIEW surroundings that drives hardware gadgets was build-up during last year. Furthermore, initial tests were taken for optimalization process of charge carrier mobility measurements in derivatives DPP.

KLÍČOVÁ SLOVA

OFET, DPP, pohyblivost nosičů náboje, LabVIEW

KEY WORDS

OFET, DPP, charge carrier mobility, LabVIEW

STŘÍTESKÝ, S. *Elektrické transportní vlastnosti materiálů pro organickou elektroniku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2012. 70 s. Vedoucí diplomové práce Mgr. Radek Přikryl, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje byly správně a úplně citovány. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FCH VUT.

.....
podpis studenta

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Mgr. Radku Přikrylovi, Ph.D. za odborné vedení a řadu cenných rad. Velké díky patří dále doc. Ing. Otu Salykovi, CSc. a doc. Ing. Martinu Weitrovi, Ph.D. za jejich vstřícnost a čas. Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří se mnou sdíleli své zkušenosti a bez jejichž účasti by tato práce nemohla vzniknout.

OBSAH

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | ÚVOD | 7 |
| 2 | TEORETICKÁ ČÁST | 8 |
| 2.1 | Organické materiály pro elektroniku | 8 |
| 2.1.1 | Historie | 8 |
| 2.1.2 | Teorie a principy v organických polovodivých látkách | 9 |
| 2.1.2.1 | Struktura | 9 |
| 2.1.2.2 | Absorpce | 10 |
| 2.1.2.3 | Exciton | 10 |
| 2.1.3 | Nosiče náboje a jevy v polovodičích | 11 |
| 2.2 | Měření pohyblivosti nosičů náboje | 11 |
| 2.2.1 | Pohyb nosičů náboje | 12 |
| 2.2.2 | Metody měření | 12 |
| 2.2.3 | FET | 13 |
| 2.2.3.1 | Teorie, princip | 14 |
| 2.2.3.2 | Dělení FETů | 14 |
| 2.2.4 | Charakterizace OFET | 17 |
| 2.2.4.1 | Výstupní charakteristika | 17 |
| 2.2.4.2 | Převodní charakteristika | 18 |
| 2.2.4.3 | Výpočet pohyblivosti nosičů náboje | 19 |
| 2.3 | DPP a jeho deriváty | 20 |
| 2.3.1 | Použití | 21 |
| 2.4 | Aparatura | 22 |
| 2.4.1 | Statická část | 22 |
| 2.4.2 | Elektrotechnická část | 23 |
| 2.4.2.1 | GPIB | 24 |
| 2.4.2.2 | RS232 | 25 |
| 2.4.3 | Komunikační protokoly | 26 |
| 2.4.3.1 | Keithley 6487 a 617 | 27 |
| 2.4.3.2 | PID regulátor NEWport | 27 |
| 2.4.4 | Virtuální instrumentace | 28 |
| 2.4.5 | LabVIEW | 29 |
| 2.4.5.1 | Princip programování | 29 |
| 3 | EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST | 30 |
| 3.1 | Použité materiály a přístrojové vybavení | 30 |
| 3.1.1 | Vzorky | 30 |
| 3.1.2 | Zařízení | 31 |
| 3.1.3 | Software | 31 |
| 3.2 | Digitální komunikace | 31 |
| 3.2.1 | Komunikace Keithley 617 | 31 |
| 3.2.1.1 | Popis zprávy pro nastavení napětí Keithley 617 | 32 |
| 3.2.1.2 | Popis zprávy pro čtení napětí Keithley 617 | 32 |
| 3.2.2 | Komunikace Keithley 6487 | 32 |
| 3.2.3 | Komunikace PID regulátoru NewPort | 34 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.3 | LabVIEW | 35 |
| 3.3.1 | Celková struktura programu | 37 |
| 3.4 | Ověření funkčnosti programu a správného zapojení | 37 |
| 3.4.1 | Odměření gigaohmového odporu | 37 |
| 3.4.2 | Ověření multimetrem Metex | 38 |
| 4 | VÝSLEDKY A DISKUZE | 39 |
| 4.1 | Program MeasFET | 39 |
| 4.1.1 | Manuální měření | 39 |
| 4.1.2 | Automatické měření | 40 |
| 4.1.3 | Vykreslování dat | 41 |
| 4.2 | Vlivy zkreslující výstupní charakteristiky | 42 |
| 4.2.1 | Měření od -60 V k 0 V | 42 |
| 4.2.2 | Měření od 0 V k -60 V | 43 |
| 4.2.3 | Vliv rychlosti měření | 44 |
| 4.2.4 | Charakteristika zkratovaného FETu | 45 |
| 4.3 | Vliv prostředí na měření | 47 |
| 4.3.1 | Světlo vs. tma | 47 |
| 4.3.2 | Vzduch vs. dusík | 48 |
| 4.4 | Vlivy na měření převodní charakteristiky | 50 |
| 4.4.1 | Vliv dV za konstantního dT | 50 |
| 4.4.2 | Vliv konstantního dV a dT | 53 |
| 4.4.3 | Vztah mezi výstupní a převodní charakteristikou | 55 |
| 4.5 | Odměřené a vypočtené hodnoty pohyblivosti | 56 |
| 4.5.1 | U_{04} | 56 |
| 4.5.2 | U_{68} | 58 |
| 4.5.3 | U_{80} | 60 |
| 5 | ZÁVĚR | 64 |
| 6 | POUŽITÉ ZKRATKY A SYMBOLY | 66 |
| 7 | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 67 |

1 ÚVOD

Díky svým vlastnostem a nízkým výrobním nákladům jsou organické polovodiče, čím dál více využívány pro elektrotechnické součástky. Široká paleta různorodých organických polovodivých látek a jejich derivátů umožňuje vytvářet vlastnosti přímo na míru pro danou aplikaci. Stěžejní parametr pro určení aplikace látek v elektronice je především pohyblivost nosičů náboje. Tento parametr, lze určovat různými metodami. Na FCH VUT v Brně byla k tomuto účelu sestavena aparatura na měření voltampérových charakteristik FET tranzistorů, z kterých se následně vypočítává pohyblivost nosičů náboje.

Součástí práce je řešerše zabývající se problematikou organických polovodičů, měření pohyblivosti nosičů náboje a elektrotechnickým informacím nutných k sestrojení měřícího programu „MeasFET“.

Experimentální část práce se zabývá vytvořením měřícího programu za využití LabVIEW a následně určení měřících metod a vlivů, které mohou přímo, či nepřímo ovlivnit potřebná měření. Vlivy a metody měření byly prováděny na vzorku 3,6-diphenyl-2,5-dihydropyrrolo[3,4-c]pyrrole 1,4-dione (U04) a následně byly určeny hodnoty pohyblivosti pro tuto látku a vybrané deriváty.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Organické materiály pro elektroniku

I když jsou organické materiály v elektronice využívány už pár let, využívají se především pro jiné účely. Například makromolekulární látky (polymerů) k výrobě plastů a nízkomolekulární látky k výrobě barviv a pigmentů. Čím dál častěji jsou v elektronice používány konjugované systémy organických látek. V důsledku střídání jednoduchých a dvojných vazeb vykazují tyto látky poměrně vysokou elektrickou vodivost. Pro polovodivé organické látky je potřeba vedle konjugovaného systému (řetězce), také přítomnost volných nosičů náboje.¹

Dle šířky zakázaného pásu, u vodivostní pásové teorie, je možné konjugované systémy třídit. Polymery s úzkým zakázaným pásem jsou dobře vodivé a k excitaci stačí malé množství energie. Proto tyto látky absorbují převážně v oblasti viditelného světla. Polymery s širším zakázaným pásem potřebují k excitaci elektronu větší množství energie, absorbují krátkovlnné modré, nebo UV záření a vidíme je tedy v doplňkové barvě převážně nažloutle nebo průhledně. Vodivost u látek s širším zakázaným pásem je poměrně nízká, ovšem pokud je v řetězci volný náboj, jeho pohyblivost zůstává vysoká.²

Elektronické součástky, lze rozdělit na pasivní a aktivní. K pasivním součástkám patří například kondenzátor. Tyto součástky nedokážou samy zpracovávat elektrický signál a rozhodující vlastností je vodivost nebo specifický odpor. Diody a tranzistory patří mezi aktivní součástky, dokážou usměrnit, zesílit nebo jinak zpracovat elektrický signál, nebo taky převést elektrickou energii na mechanickou, akustickou, světelnou či naopak.

Elektronické součástky byly dlouhou dobu vyráběny z anorganických materiálů, především z křemíku, nebo GaAs. V 80. letech minulého století se teprve začal klást důraz na organické materiály, které by mohly nahradit anorganické a díky možnosti syntetizování nových organických látek, vytvářet vlastnosti, které předčí vlastnosti anorganických materiálů. Prostřednictvím navázáním bočních skupin, nebo modifikací řetězce, je možné měnit konzistenci látky, rozpustnost a další vlastnosti.³

Většina organických materiálů má šířku zakázaného pásu okolo 3 eV, což je trojnásobný oproti anorganickým polovodičům. Pohyblivost u většiny organických látek se pohybuje v řádu $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$, kdežto pohyblivost u křemíku je o 6 řádů vyšší, tedy $10^3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.⁴

2.1.1 Historie

O největší rozvoj organické elektroniky se zasloužili Alan J. Heeger, Alan MacDiarmid a Hideki Shirakawa. Tito pánové v 80. letech náhodou objevili a následně popsali elektronovou vodivost v π -konjugovaném polymeru. Za tento přínos vědě dostali v roce 2000 Nobelovu cenu. Díky nim došlo k rozvoji polymerů v oblasti antistatických povlaků, elektromagnetického stínění, tranzistory, diody, senzory a spousta dalších.⁵

Vedle π -konjugovaných polymerů se v současnosti začíná využívat také organických molekulárních látek. Příkladem může být ftalocianin, fulleren nebo diketopyrrolopyrol. Tyto látky jsou díky svým látkám hojně využívány v tranzistorech, organických solárních člancích, diodách a dalších.⁶

2.1.2 Teorie a principy v organických polovodiivých látkách

Pro pochopení jevů a vnější elektrických vlastností organických polovodiivých látek, je zapotřebí znát základní principy, jež se v těchto látkách odehrávají. Pro dokonalé pochopení těchto principů je zapotřebí nejen znát základní vlastnosti a principy od atomární úrovně, ale i jejich vztah k molekulární struktuře, tvaru molekuly, uspořádání molekul a spoustu dalších okolností.

2.1.2.1 Struktura

Již v roce 1913 Bohr formuloval pravidla pro popis a chování elektronů. V izolovaném atomu existují diskrétní energetické hladiny, na kterých může být elektron přítomen, nebo, kterých může dosahovat. Pokud se k sobě přiblíží neutrální izolované atomy pevné látky tak, aby byla vytvořena krystalová mřížka, dochází k vzájemnému překryvu vlnových funkcí těchto atomů. To vede k interakci elektronů z různých atomů a vzniká hybridizovaný atomový orbital s dvěma rozštěpenými hladinami. Pokud jsou tedy atomy blízko sebe, dochází k delokalizaci elektronů v pásu povolených energií.⁷

Elektrony, které jsou blíže k jádru atomu, jsou silně vázány a nepodílí se na elektrické vodivosti. Elektrony ve valenční vrstvě (pásu) a samotný orbital této vrstvy je zodpovědný za chemické vazby. Vodivostní pás, který je energeticky ještě výše je zodpovědný za elektrickou vodivost. Mezi valenčním a vodivostním pásem se nachází oblast zakázaného pásu a podle šířky tohoto pásu se rozděluje materiál na vodič, polovodič nebo izolant. Fermiho hladina, je energetická hladina, která je s pravděpodobností 50% obsazena elektrony. Její poloha je tedy mezi valenčním a vodivostním pásem. Pokud je Fermiho hladina blíže k vodivostním pásu, pak je polovodič typu *n* (elektronový) a naopak, pokud je Fermiho hladina blíže k valenčnímu pásu, je materiál polovodičem typu *p* (děrový).⁸

V anorganických materiálech je převážná většina interakcí mezi atomy tvořena silnými iontovými nebo kovalentními vazbami. Vytváří se řetězec nelokalizovaných energetických pásů po celé krystalové mřížce, které jsou oddělené zakázaným pásem. V organických materiálech je tomu naopak. Jednotlivé částice u organických materiálů drží pohromadě slabé interakce, jako jsou například Van der Waalsovy síly, dipólové interakce a vodíkové můstky. V porovnání s anorganickými materiály je u organických materiálů větší mezimolekulová vzdálenost a přeskok náboje se tím znesnadňuje.

Uhlík, jakožto základní stavební článek organických materiálů má ve valenční vrstvě 4 elektrony. Tři z nich jsou využity k vazbám typu σ pro konjugovaný řetězec a čtvrtý je přítomen kolmo na sp^2 degenerovaný orbital. Tento čtvrtý elektron se podílí na dvojně vazbě typu π , která je tvořena bočním překryvem. Boční překryv orbitalů je menší, proto je i vazba π slabší než vazba σ . Elektrony se tak mohou více pohybovat avšak vazba samotná má menší stabilitu. Pokaždé, když vznikne vazebný orbital σ a π , vzniká i protivazebný orbital σ^* a π^* . Protivazebné orbitály nejsou v základním stavu obsazeny, nebo jsou obsazeny je částečně.⁹

V konjugovaném systému dvojných a jednoduchých vazeb, dochází k interakci π orbitalů a vzniká delokalizovaný systém. Elektrony jsou potom v tomto delokalizovaném systému rovnoměrně rozloženy podél konjugovaného řetězce. Elektrony π se tedy mohou v rámci konjugovaného řetězce (jedné molekuly) volně pohybovat a stát se možnými volnými nosiči náboje.

2.1.2.2 Absorpce

V závislosti na vlnové délce absorbovaného záření může dojít k různým typům excitace. Nejdůležitější pro vznik a pohyb volných nosičů náboje, je absorpce ultrafialového (UV) a viditelného záření (VIS). Změna energie, resp. energie absorbovaná, či jiným způsobem dodaná, vede ke změně elektronového stavu. Přijetím kvanta energie, které musí být minimálně rovno, nebo vyšší, než je rozdíl energií nejvyššího obsazeného molekulového orbitalu (valenčního – highest occupied molecular orbital – HOMO) a nejnižšího neobsazeného (vodivostního – lowest unoccupied molecular orbital – LUMO), je elektron vybuzen do vyšší energetické hladiny. Převážně se jedná o přechod z vazebného π orbitalu, nebo nevazebného n orbitalu do protivazebného π^* orbitalu.

Energie potřebná k excitaci elektronu je také závislá na délce konjugovaného řetězce. Čím je řetězec delší, tím se zvyšuje polarizační energetická hladina pevného materiálu a energetický rozdíl mezi HOMO a LUMO, se zmenšuje. Proto v tomto případě k excitaci elektronu postačuje menší energie. Materiál s delším řetězcem tak absorbuje světlo o nižší energii a vyšší vlnové délce.

Excitovaný stav elektronu je krátkodobý a nestabilní. Systém se snaží dostat do nejméně energeticky náročného stavu. Zpět z excitovaného do základního stavu, může dojít několika způsoby:¹⁰

- a) Luminiscencí.
- b) Biomolekulárním zhášením.
- c) Senzibilizací.
- d) Izomerací, ionizací, fragmentací nebo intermolekulární reakcí.
- e) Přenosem náboje.

Poslední jmenovaný případ je nejdůležitější pro tuto práci. Přenos je možno popsat na příkladě směsi dvou molekul. První s nízkým ionizačním potenciálem (donorem elektronů) a druhým s vysokou elektronovou afinitou (akceptorem elektronů). Už v základním stavu se u směsi těchto dvou molekul objevují absorpční pásy, které u samostatných molekul neexistují. Tyto pásy jsou vysvětlovány tvorbou donor-akceptorových komplexů. Část náboje, nebo i celý elektron přechází z donoru na akceptor. Pokud dojde k přenosu celého náboje, hovoříme o přenosu elektronu. Elektron a vzniklá díra po přenosu elektronu se mohou po materiálu dále pohybovat a v elektrickém poli se materiál stává fotovodivým.

2.1.2.3 Exciton

Případ, kdy po absorpci kvanta záření ve formě fotonu vzniká volný nosič náboje (elektron nebo díra) je pouze zjednodušený model. Ve skutečnosti, při absorpci v organickém materiálu ihned nevzniká volný nosič náboje, vzniká tzv. exciton. Exciton je excitonový elektron, který je stále vázán Coulombickými silami k díře a vazebná energie tohoto páru je přibližně 0,4 eV. Exciton má tedy nižší energii, než volný ionizovaný pár elektron-díra. Je to kvazineutrální částice a proto, pokud nedojde k rozdělení (disociaci), nepřispívá exciton k vodivosti materiálu. Disociace může nastat například teplem, nebo elektrickým polem.

Exciton byl poprvé popsán v roce 1931 Frenkelem a nazval ho excitační vlnou. Frenkelův exciton se vytváří nebo vyskytuje v materiálech s nízkou dielektrickou konstantou. Pár elektron-díra je součástí jedné molekuly a vazebná energie může dosahovat, až 1 eV. Mezi další excitony patří Davydovův nebo Wannierův exciton. Popis Davydova excitonu přísluší

molekulárním krystalům aromatických sloučenin. Wannierův exciton má odlišnou teorii excitonu a vyskytuje se v polovodičích s vysokou dielektrickou konstantou.¹¹

Difúzí excitonu k rozhraní řetězce dochází k vytvoření polaronového páru. Další disociací polaronového páru, mohou vznikat volné nosiče náboje, může rekombinovat, nebo může být odveden elektrodami.¹²

2.1.3 Nosiče náboje a jevy v polovodičích

Jak už bylo řečeno, mezi nosiče náboje patří elektrony a díry. Vznik těchto nosičů může probíhat různými způsoby. Například fotogenerování nebo generování v elektrickém poli. Pohyb nosičů lze rozdělit na tři základní mechanismy. Vodivostí podél konjugovaného řetězce, přeskok mezi řetězci a tunelováním mezi více a méně vodivými segmenty molekuly, případně krystalové mřížky.

V polovodičích může docházet i k dalším jevům, než jen k samotnému přenosu náboje. Jevy týkající se přímo nosičů náboje a jejich přenosu jsou generace, difúze, rekombinace a doba života nosičů náboje, která je určena časovým intervalem od vzniku nosiče náboje, po jeho zánik rekombinací.¹³

Generování volných nosičů náboje probíhá, jak bylo uvedeno, nejdříve excitací elektronu dodáním energie ve formě absorpce fononu, zvýšením tepla, nebo elektrickým polem.

Difúzi je možné popsat jako proces přemísťování částic v prostoru s větší koncentrací do prostoru s menší koncentrací, bez elektrického pole. Pokud působí elektrické pole, dojde vedle difúze i k driftu a celkový proud je potom součtem těchto dvou proudů. Difúzi popisují matematicky Fickovy zákony. K difúzi patří i difúzní délka, což je hodnota střední vzdálenosti, kterou překonají nosiče mezi generací a rekombinací.^{14,15}

Rekombinace je děj, při kterém dochází k zániku nosičů náboje. Aby došlo k rekombinaci, musí dojít ke srážce mezi elektronem a kladně nabitým centrem. Existují různé druhy (teorie) rekombinací. Jednou z nich je mezipásmová rekombinace, kde dochází k zániku volného elektronu a volné díry. U této teorie může dojít k zániku třemi způsoby, přechodem elektronu z vodivostního pásu do valenčního za vyzáření energie ve formě fononu (zářivá rekombinace) nebo předáním energie kmitům mřížky (nezářivá) a nárazem tří (nebo více) nosičů náboje, kdy dva z nich mohou rekombinovat a současně předávají energii třetímu nosiči, který přechází na vyšší energetickou hladinu.¹⁶

Dalším typem (principem) rekombinace je pomocí rekombinačních center. Energetická hladina těchto center se nachází v blízkosti středu zakázaného pásu polovodiče. K přenosu náboje (elektronu a díry) jsou využívány právě ty energetické hladiny, které jsou blíže středu zakázaného pásu a doba života nosičů je tak ovlivněna koncentrací těchto center. Centra jsou vytvářena různými druhy příměsí (nečistoty) nebo poruchami v krystalové mřížce. V reálném polovodiči k rekombinaci nikdy nedojde rovnoměrně v celém objemu a uplatňuje se i povrchová rekombinace. Povrchová rekombinace se vyskytuje především u materiálu, který má porušenou strukturu u povrchu. Ovlivňuje průběh rekombinačních procesů především u vzorků menších rozměrů, nebo při generaci nosičů v blízkosti povrchu.¹⁷

2.2 Měření pohyblivosti nosičů náboje

V posledních pár letech dochází k celosvětovému rozšíření organické elektroniky. Dochází ke zvýšení elektronové pohyblivosti, světelné emise s různým rozsahem frekvencí, demonstrace spinové elektroniky a spousta dalších. Navzdory těmto povzbuzujícím slibům, je

zde spousta překážek, které brání většímu rozšíření organické elektroniky. Ve většině zařízení je hlavním pracovním procesem transport náboje a proto použité materiály vyžadují vysoký výkon nábojové pohyblivosti. Pohyblivost nosičů náboje je rozhodujícím faktorem pro rychlost elektronických zařízení. Mezi největší výzvy pro vědce patří porozumění podstatě nábojové injekce a transportu náboje v organických látkách. Navzdory jednoduché definici pohyblivosti náboje je obtížné měřit rychlost náboje a přesně určit pohyblivost nosičů. Pro určení pohyblivosti náboje existují různé metody, které mají své výhody a nevýhody.

2.2.1 Pohyb nosičů náboje

Pohyb nosičů náboje v organických látkách, ať už polymerech nebo organických materiálech s malou molekulovou hmotností, je určena třemi základními mechanismy:

- a) Vodivost podél konjugovaného řetězce případně hlavního řetězce
- b) Přeskoky mezi řetězci (molekulami)
- c) Tunelování mezi vodivými segmenty, které jsou odděleny méně vodivými oblastmi

Pohyblivost v anorganických materiálech (μ) je určena jako poměr průměrné driftové rychlosti nosičů (v_d) a aplikovaného elektrického pole (E). Pohyblivost dosahuje mnohem vyšších hodnot než $1 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ na úkor přírodní povaze těchto materiálů. Pohyb děr a elektronů je v anorganických polovodičích uskutečněn jako vysoce delokalizovaná plošná vlna a jejich pohyb je limitován rozptylem zvukových fononů nebo nábojovými defekty. Rozptyl nosičů je úměrný teplotní závislosti $\mu \sim T^{-3/2}$ a proto, se snižující se teplotou, pohyblivost v anorganických polovodičích stoupá.

V neuspořádaných systémech, jako jsou například polovodivé polymery, je transport nosičů způsoben přeskokem mezi lokalizovanými místy, kde fonony pomáhají překonat energetický rozdíl mezi těmito místy. Teplota pomáhá přeskokům mezi lokalizovanými místy nosičů náboje, čímž se zvyšuje pohyblivost, avšak je řádově nižší, než způsobená výše zmíněným transportem. Nicméně pohyblivost se zvyšuje se zvyšující se teplotou.

Když je elektrické napětí aplikováno na sendvičový vzorek mezi dvěma elektrodami, nosiče náboje jsou transportovány přes vzorek pod elektrickým polem. Podstatné je, jak rychle a jakým mechanismem jsou nosiče náboje transportovány.

Rychlost nosičů náboje je přímo úměrná síle aplikovaného elektrického pole a je vyjádřena rovnicí (1).

$$v = \mu F \quad (1)$$

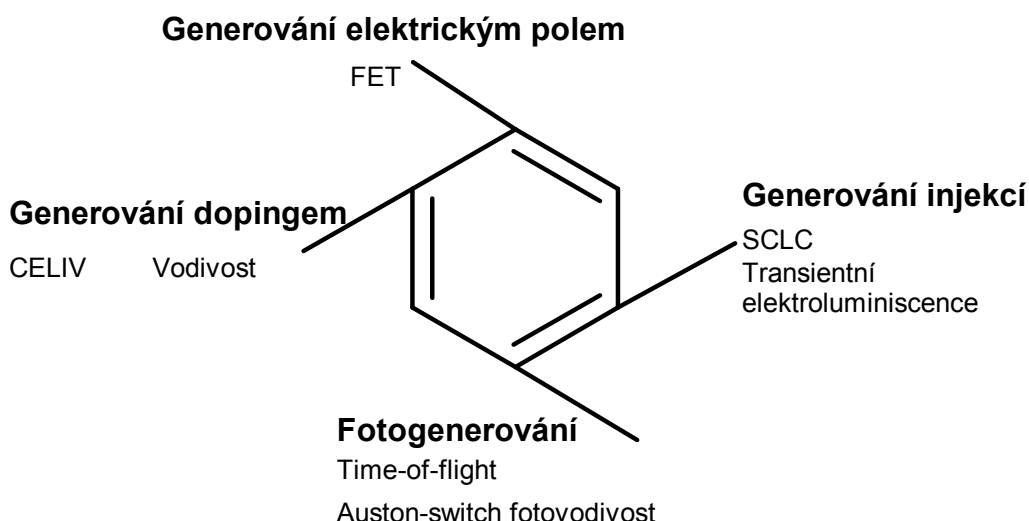
Kde v je rychlost nosičů náboje, F je síla elektrického pole a přímo úměrná veličina μ je driftová pohyblivost nosičů náboje. Pohyblivost je tedy definována jako vzdálenost, přes kterou jsou nosiče náboje transportovány za jednu sekundu a pod jednotkovým elektrickým polem. Pohyblivost nosičů náboje v organických materiálech se značně mění a je závislá na druhu náboje (díra nebo elektron), molekulární struktuře a morfologii materiálu.

2.2.2 Metody měření

Vysoká pohyblivost v anorganických materiálech se měří Hallovým efektem nebo vodivostním měřením. Driftová pohyblivost je potom spojena s Hallovou pohyblivostí určenou rozptylovým faktorem. Tento rozptylový faktor závisí na rozptylovém mechanismu a distribuční funkci nosičů. Tyto dvě metody nejsou vhodné pro vysoko odporové polymery

s nízkou pohyblivostí nosičů. Pro standardní voltampérovou křivku nemůže být pohyblivost měřena, protože v ohmické oblasti elektrický proud závisí na hustotě náboje a jeho pohyblivosti. Z tohoto důvodu se přistupuje k dalším metodám.

Driftová pohyblivost nosičů náboje ve vysoko odporových organických materiálech s nízkou pohyblivostí nosičů náboje může být určena různými technikami, jako je například time-of-flight (TOF) metoda, analýza steady-state, trap-free space-charge limited current (TF-SCLC), analýza temnotní injekce SCLC, analýza výkonu FET (field effect transistor), měření přechodové elektroluminiscence a pulzní radiolýza časově rozlišená mikrovlnná vodivostní technika.¹⁸ Názorný přehled jednotlivých technik lze vidět na Obr. 1.



Obr. 1 Různé techniky měření pohyblivosti

Jednou z nejdůležitějších rozdílů mezi jednotlivými metodami je geometrie vzorku, ve kterém je pohyblivost nosičů náboje charakterizována. Každá metoda vyžaduje jinou tloušťku vzorku. Například u metody TOF a SCLC je vzorek v sendvičovém uspořádání mezi dvěma elektrodami a nábojová vodivost je kolmá k ploše substrátu. Oproti tomu lze v ploše substrátu charakterizovat pohyblivost u fetového měření.

Metoda Time-of-flight je velmi efektivní technika pro studium transportu nosičů náboje a rekombinace v nízko vodivých materiálech. CELIV (charge extraction by linearly increasing voltage) metoda nám umožňuje pozorovat foto-generování a rovnováhu nosičů v materiálech. CEPV (carrier extraction by pulsed voltage) metoda se používá pro studium koncentrace fotogenerovaných nosičů náboje v závislosti na čase.

Geometrické odlišnosti jsou irelevantní, pokud je studium transportních vlastností zaměřeno na amorfni materiály, ale pokud se studují vlastnosti v materiálech s nějakou molekulární strukturou, jako jsou kapalné krystaly nebo krystalické materiály, pak se tyto odlišnosti stávají velmi podstatnými.¹⁸

2.2.3 FET

Field-effect transistor, česky řečeno transistor řízený elektrickým polem je polovodičový prvek vedoucí elektrický proud, jehož velikost je řízena elektrickým polem, který působí kolmo na protékající elektrický proud. Vedení proudu je uskutečněno majoritními nosiči elektrického proudu (elektrony, díry), proto se nazývají unipolární.¹⁹

První FET byl navrhnut J. E. Liliendfeldem, který dostal za tento nápad v roce 1930 patent.²⁰ Navrhnul fetové chování jako kondenzátor s vodivým kanálem mezi kolektorem a emitorem. Aplikováním napětí na elektrodu báze kontroloval množství nosičů náboje proudící skrz systém. První tranzistor s řízeným elektrickým polem navrhl a připravil v roce 1960 Kaghna a Atalla užitím metal-oxidového polovodiče, známý v dnešní době jako MOSFET (metal-oxide-semiconductor FET). Tranzistory hrají důležitou roli v miniaturizaci elektrických zařízení a nahradili dříve používané elektronky. V dnešní době je v čípech natěsnáno několik milionů tranzistorů.²¹

2.2.3.1 Teorie, princip

Jak už bylo řečeno, FET je polovodičová součástka a podle druhu vodivosti typu N nebo P. Součástka je opatřena dvěma elektrodami – S a D (source a drain), mezi kterými má protékat elektrický proud. Další elektroda G (gate) je umístěna mezi S a D elektrodou tak, aby elektrické pole působilo kolmo na procházející proud.

Podle principu lze tranzistory rozdělit na unipolární či bipolární – polem řízené. Bipolární tranzistor je založen na interakci dvou PN přechodů, resp. uspořádání PNP nebo NPN. Unipolární tranzistor je založen na principu vedením pouze jedním typem náboje.

Unipolární tranzistory jsou založeny na principu řízení pohybu nosičů náboje elektrickým polem, kde se vedení proudu uskutečňuje v tzv. kanále pouze jedním typem nosičů náboje, proto tedy název unipolární. Na rozdíl od bipolárního tranzistoru, kde vodivost je řízena injekcí minoritních nosičů do báze, je u unipolárního řízena dvěma způsoby:

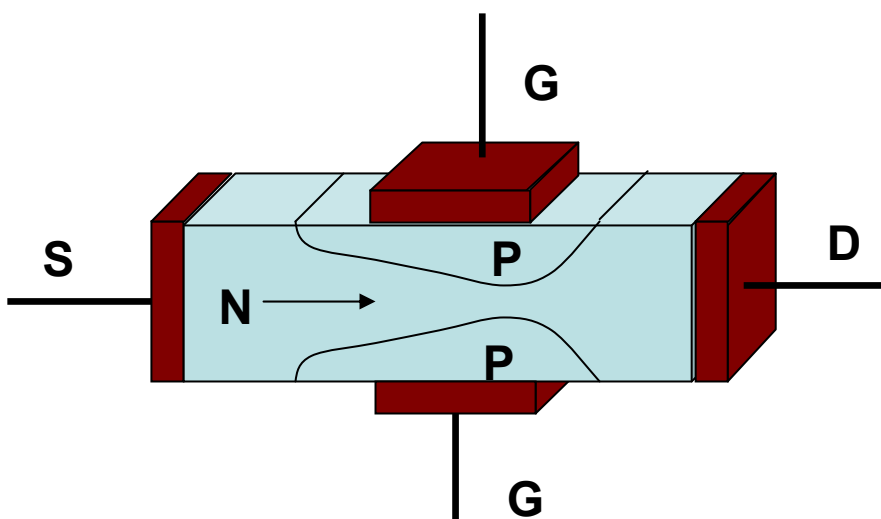
- a) změnou průřezu vodivého kanálu
- b) změnou koncentrace majoritních nosičů

2.2.3.2 Dělení FETů

Tranzistory řízené elektrickým polem lze rozdělit podle použitého materiálu na anorganické a organické. FETy lze dále rozdělit na tři základní typy:

- a) tranzistory s přechodovým hradlem – junction FET (JFET)
- b) tranzistory s izolovaným hradlem – insulated gate FET (IGFET)
- c) tenkovrstvé tranzistory s izolovaným hradlem – thin film tranzistor (TFT)

JFET tranzistory jsou obvykle s přechodem PN a ve speciálních případech se Schottkyho přechodem. Pro lepší pochopení principu je tento typ popsán k Obr. 2.

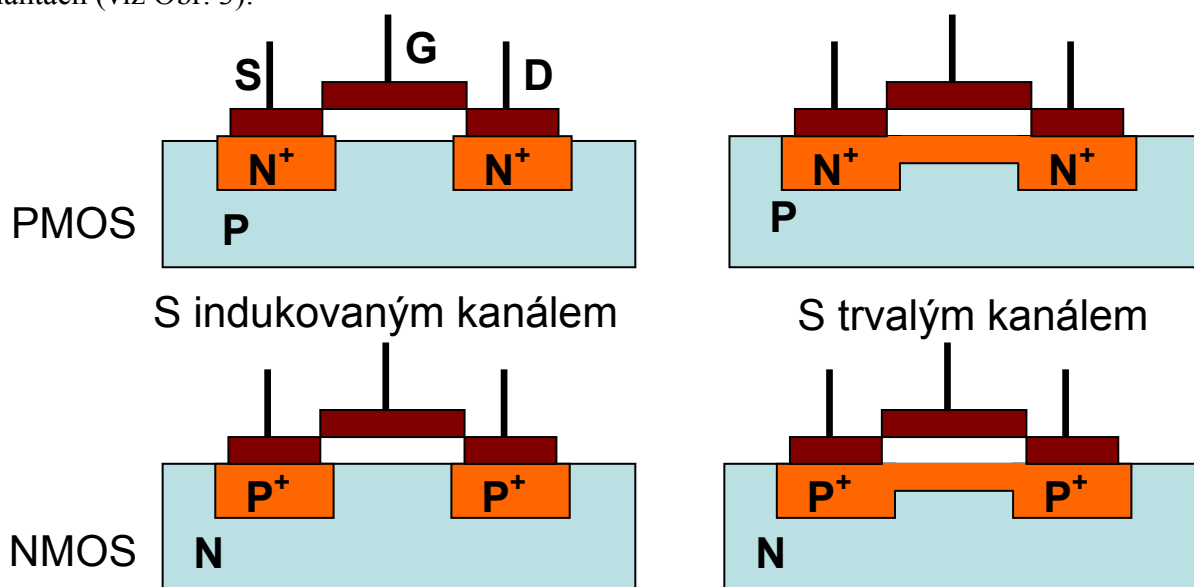


Obr. 2 Schéma JFET tranzistoru

Na Obr. 2 vidíme princip provedení tranzistoru. Vlastní pracovní oblast se nazývá kanál a v tomto případě má N vodivost. Kanál ústí do dvou oblastí N^+ , tyto oblasti jsou opatřeny dvěma neusměrňujícími elektrodami. Jedna z nich je emitor (označena jako S – source tj. zdroj) a druhá elektroda kolektor (označena D – drain, odtok či sběrná elektroda). Kontakty na horní a dolní straně jsou přívody k řídící elektrodě G (hradlo nebo taky gate), která je tvořena vrstvou opačné vodivosti než kanál, tedy v tomhle případě P^+ .

Přechod mezi G a S elektrodou je polarizován v závěrném směru a potenciál (napětí) na gate elektrodě ovládá proud tekoucí kanálem mezi S a D elektrodou. Když je přechod polarizován mezi G a S elektrodou v závěrném směru, rozšiřuje se oblast prostorového náboje do méně dotovaného polovodiče, tj. N kanálu. Tím tedy dochází ke změně tloušťky uvažovaného vodivého kanálu.

IGFET neboli unipolární tranzistor s izolovanou řídící elektrodou využívá pro svou funkci elektrické pole, které ovládá přes tenkou vrstvu izolantu vodivost polovodiče pod touto vrstvou. Pro tento typ se taky často používá zkratka MOS. Tento typ existuje ve čtyřech variantách (viz Obr. 3).



Obr. 3 Typy tranzistoru MOS

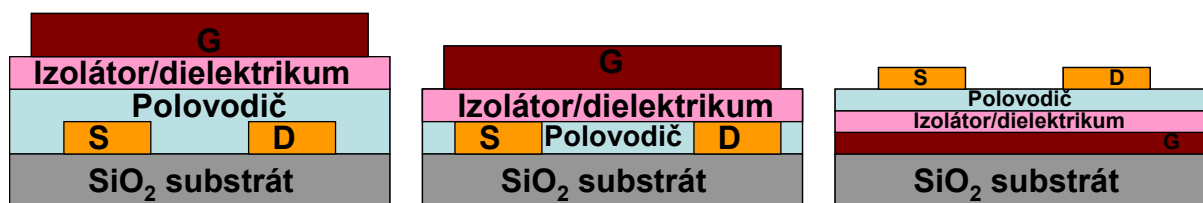
Vodivý kanál může být typu N nebo P a může existovat již při nulovém napětí na G elektrodě (tzv. tranzistor s trvalým kanálem) nebo vznikne až při určité velikosti kladného nebo záporného napětí na gate elektrodě (s indukovaným kanálem), které se nazývá prahové napětí (nebo taky threshold napětí U_t).

Ideální struktura MOS je tvořena z kovové elektrody, ideálního izolantu, přes který nemůže protékat žádný proud a neobsahuje žádné volné nosiče, a z homogenně dopovaného polovodiče (případně „vlastního“ polovodiče), který je na spodní straně opatřen ohmickým kontaktem.

Princip MOS bude vysvětlen na prvním typu, tj. PMOS, s indukovaným kanálem. Pokud není na hradlo (G) přiložené napětí, odpovídá zapojení S a D elektrody (source a drain) sériovému zapojení dvou přechodů PN a NP. Budeme-li uvažovat, že na povrchu polovodiče typu P v prostoru mezi oblastí emitoru (S) a kolektoru (D) je ochuzená vrstva, tak potom prochází mezi těmito dvěma elektrodami pouze zbytkový proud. Pokud ovšem je na G elektrodu přiloženo dostatečně velké kladné napětí, vytvoří se inverzní vrstva (v tomto případě vrstva typu N) a mezi oblastí emitoru a kolektoru se vytvoří povrchový kanál o stejném typu vodivosti, jaké mají oblasti S a D elektrody. Tímto kanálem může procházet velký proud, přičemž velikost proudu může být řízena přiloženým napětím na hradlo.²²

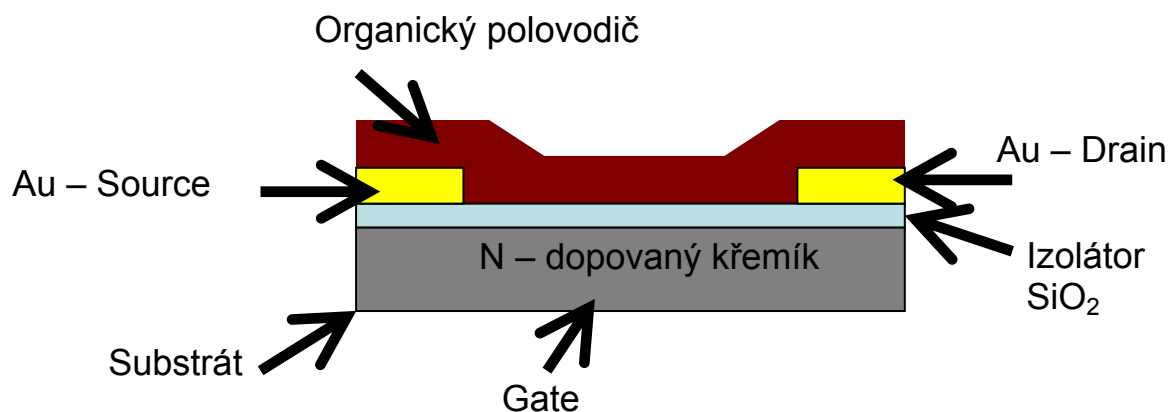
Tenkovrstvé tranzistory (thin film transistor TFT) jsou podobné struktury jako MOS tranzistory, liší se od nich jen tím, že všechny kovové, polovodičové a dielektrické vrstvy jsou tvořeny tenkými vrstvami. Kanál u tohoto typu tranzistoru je vymezen vzdáleností S a D elektrody. Princip tohoto tranzistoru je stejný jako u tranzistoru MOS.²³

Dělení TFT je založeno na umístění polovodiče, dielektrika a poloze jednotlivých elektrod. Příklady tří typů tranzistorů lze vidět na Obr. 4.



Obr. 4 Typy TFT tranzistorů

Čtvrtým příkladem tenkovrstvého uspořádání tranzistoru je na Obr. 5, který je zároveň používaný v této diplomové práci. Polem řízený organický tranzistor (organic field-effect transistor – OFET), je složen ze substrátu, izolátoru, zlatých elektrod a organické polovodivé vrstvy. Substrát je zde N – dopovaný křemík, který slouží zároveň jako elektroda gate (G elektroda). Na ní je vrstva SiO_2 izolátoru (dielektrika), která se vytváří termální oxidací křemíkového substrátu. Na této vrstvě jsou 2 elektrody ze zlata ve tvaru hřebenu. Na komerčně dostupném substrátu o rozměrech 1x1 cm je napařeno 16 párů elektrod, respektive 16 FETů. A na takovýto komerčně dostupný substrát se nanáší vrstva organické polovodivé látky.²⁴



Obr. 5 Struktura OFETu v tenké vrstvě

V důsledku přiloženého napětí na elektrodu G, tedy vzniku elektrického pole se vytváří v organickém polovodiči volné nosiče náboje. Pohyb volných nosičů náboje je zajištěn napětím mezi emitorem a kolektorem, kde se v důsledku elektrostatických sil vytváří tenký vodivý kanál. Jestliže není zároveň elektrické napětí na G, nebo je toto napětí malé, nejsou v polovodiči přítomny volné nosiče náboje a výsledná vodivost je nízká a tranzistor je tzv. vypnutý. Hodnota napětí na elektrodě G, kdy se začne vytvářet dostatečné množství volných nosičů náboje je označován jako prahové (threshold) napětí. Toto napětí lze odečíst z voltampérové převodní charakteristiky, kterou po proložení křivky přímkou a jejím prodloužením na nulový proud dostaneme na napěťové ose. Směrnice této přímky je využívána i ve výpočtu pohyblivosti nosičů náboje dle rovnice (2),

$$\mu = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_G} \cdot \frac{L}{W \cdot C_i \cdot V_{DS}} \quad (2),$$

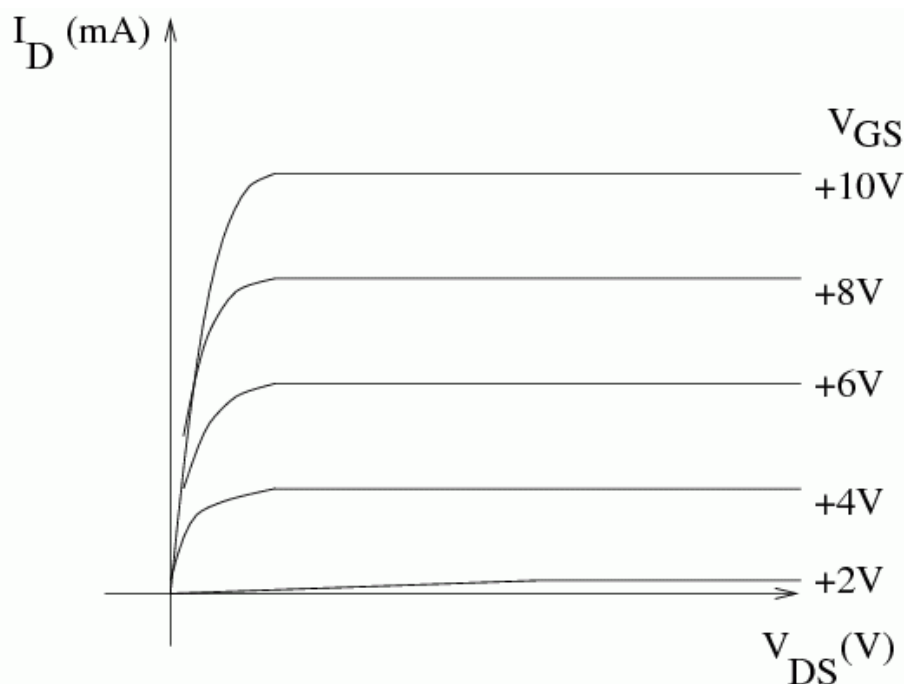
kde μ je pohyblivost nosičů náboje, $\partial I_{DS} / \partial V_G$ je směrnice přímky proložená lineárním nárůstem proudu voltampérové transferové charakteristiky, W je vzdálenost mezi elektrodami, L je celková délka elektrod, C_i je kapacita substrátu, V_{DS} je konstantní napětí mezi kolektorem (source) a emitorem (drain).

2.2.4 Charakterizace OFET

Charakterizace organických FET tranzistorů je odvozena od anorganických. Typickými voltampérovými charakteristikami unipolárních tranzistorů řízených elektrickým proudem je zejména výstupní a převodní charakteristika. Obě tyto charakteristika spadají do kategorie statických charakteristik.

2.2.4.1 Výstupní charakteristika

Typickým charakteristickým chování FETů je jejich voltampérová charakteristika, kterou je možné vidět na Obr. 6.



Obr. 6 Voltampérová výstupová charakteristika FETu

Na tomto obrázku je závislost proudu mezi elektrodami kolektorem a emitorem (source a drain) v závislosti na přiloženém napětí mezi těmito elektrodami. Navíc typickou charakteristikou je, že při zvýšení, či snížení elektrického pole na bázi (gate) se zvýší, či sníží procházející proud mezi kolektorem a emitorem. Toto chování je charakteristické pro FET, ve kterém je přítomen N typ polovodiče. Pro P typ polovodiče vypadá charakteristika obdobně, ale má charakteristiku pro záporné U_{SD} , záporné U_G a tedy i záporný proud.

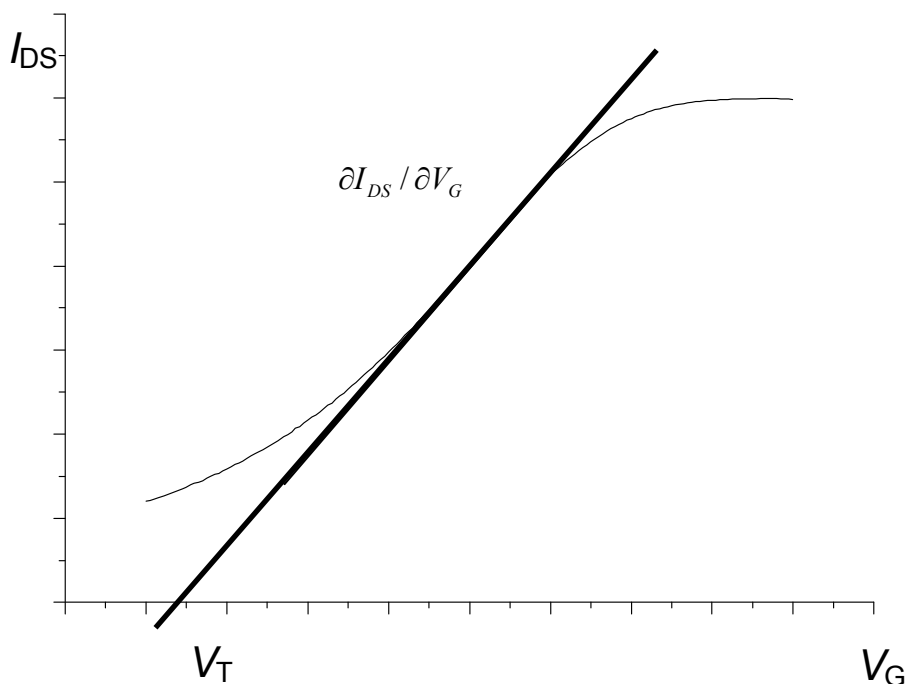
Tento graf lze rozdělit do dvou oblastí. První oblast tvořená lineárním nárůstem proudu při zvyšujícím se napětí se nazývá ohmická oblast. Druhá oblast, saturační, resp. oblast nasycení, je část grafu, kde při zvyšujícím se napětí proud dále neroste a zůstává převážně konstantní.

Tento graf patří mezi statické charakteristiky a neměl by být ovlivněn dynamickými vlastnostmi FETu (polovodiče).

2.2.4.2 Převodní charakteristika

Převodní charakteristika nebo taky transferová, určuje velmi důležitý parametr tranzistorů. Jedná se o sklon převodní charakteristiky tzv. strmost S , která je dána směnicí přímky lineárního nárůstu proudu. Pomocí směrnice přímky lze potom dopočítat pohyblivost nosiče náboje.

Charakteristiku, z níž se vypočítává pohyblivost volných nosičů náboje, lze vidět na Obr. 7. Na tomto grafu je vidět ideální charakteristika FETu při konstantním napětí mezi kolektorem a emitorem a zároveň při zvyšujícím se napětí na hradle s daným procházejícím proudem mezi kolektorem a emitorem.



Obr. 7 Typická voltampérová transferová charakteristika FETu

Z grafu, lze dále vyčíst prahové napětí (V_T), při kterém dochází ke zvýšení procházejícího proudu mezi S a D elektrodou. Tento graf patří taky mezi statické charakteristiky FETů.

2.2.4.3 Výpočet pohyblivosti nosičů náboje

Výpočet pohyblivosti nosiče náboje v polovodiivém materiálu je určující parametr pro moderní elektronické přístroje využívající transport náboje v hlavním pracovním procesu elektronických součástek.

Výpočet pohyblivosti je poměrně komplikovaný proces. Vzhledem k nízkým pohyblivostem u organických materiálů, je potřeba optimalizovaného výpočtu i měření. Většina publikací týkající se výpočtu pohyblivosti nosičů náboje uvádí i vztah, podle kterého pohyblivost počítají. Všechny tyto vztahy se dělí na dvě skupiny a to pro výpočet pohyblivosti v ohmické oblasti (malé napětí mezi S a D elektrodou) a pro saturovanou oblast. Jednotlivé vztahy pro výpočet v ohmické i saturované oblasti lze vidět v Tabulka 1.

Tabulka 1 Příklady vzorců pro výpočet pohyblivosti nosiče náboje.

| Lineární (ohmická) oblast | Nasycená (saturační) oblast |
|---|---|
| $\mu_{LIN} = \frac{I_{SD}}{(V_G - V_T) \cdot V_{SD}} \cdot \frac{L}{C \cdot W}$ | $\mu_{SAT} = \frac{I_{SD}}{(V_G - V_T)^2} \cdot \frac{2 \cdot L}{C \cdot W}$ |
| $\mu_{LIN} = \frac{\partial I_{SD}}{\partial V_G} \cdot \frac{L}{C_i \cdot W \cdot V_{DS}}$ | $\mu_{SAT} = \left[\frac{\partial (I_{SD})^{1/2}}{\partial V_G} \right]^2 \cdot \frac{2 \cdot L}{C \cdot W}$ |

V uvedených vzorcích v Tabulka 1 je μ pohyblivost nosičů náboje, $\partial I_{DS} / \partial V_G$ je směrnice přímky proložená lineárním nárůstem proudu voltampérové transferové charakteristiky, I_{SD} je

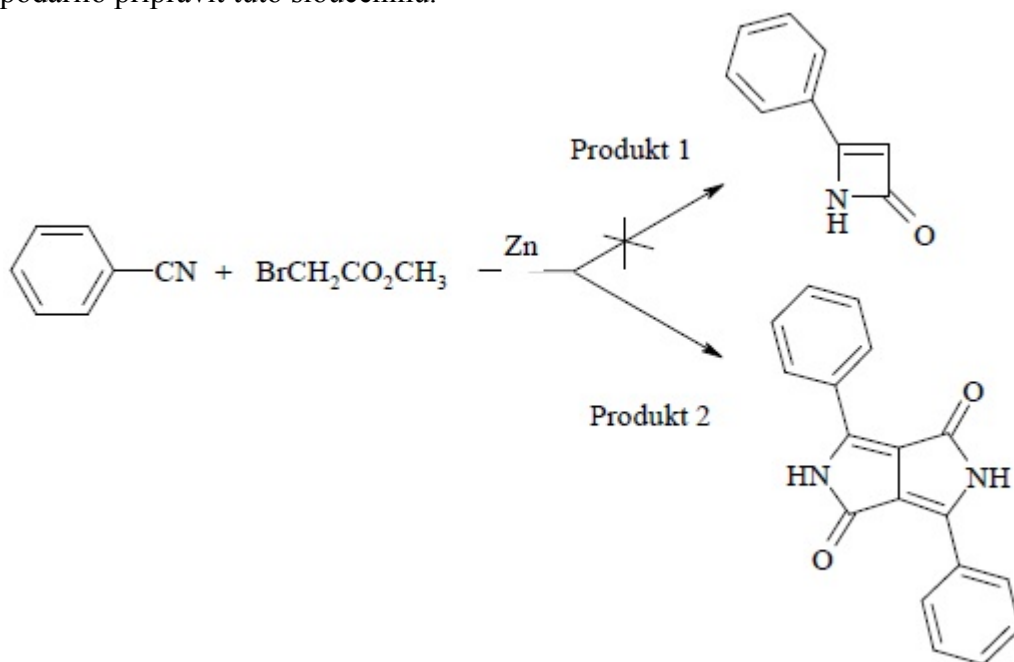
proud mezi elektrodami S a D, V_G je napětí přiložené na G elektrodu, V_{DS} je konstantní napětí mezi kolektorem (source) a emitorem (drain), W je vzdálenost mezi elektrodami, L je celková délka elektrod, C_i je kapacita substrátu a V_T je limitní napětí (threshold).

2.3 DPP a jeho deriváty

Hlavní parametry, které určují výkon elektronických součástek, jsou vlastnosti použitých materiálů. Hledá se spousta nových látek, které by mohly mít tu danou vlastnost pro aplikaci, v níž budou využívány. Příkladem těchto vlastností může být například vysoký molární absorpční koeficient, vysoká pohyblivost či fluorescence a spousta dalších.

Vedle konjugovaných polymerů se v poslední době berou do popředí zájmu i nízkomolekulární látky. Jedná se o molekuly s konjugovaným systémem, ve kterém se velmi často objevují atomy dusíku, kyslíku, halogenu, či případně kovu jako centrálního atomu v komplexu. Jedním z těchto příkladů nízkomolekulární látky je i diketopyrolopyrol, jehož deriváty jsou používány v praktické části této diplomové práce.

Sloučenina 1,4-diketo-3,6-difenyl-pyrol- $[3,4-c]$ -pyrol (DPP) byla poprvé omylem syntetizována v roce 1974, kdy produktem měl být laktam (Obr. 8 produkt 1) avšak místo něj, se podařilo připravit tuto sloučeninu.²⁵



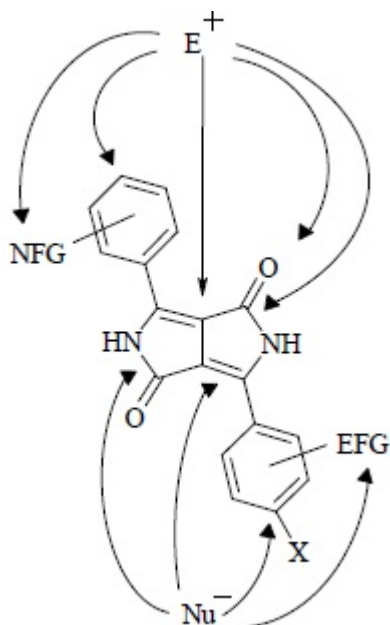
Obr. 8 Syntéza laktamu a DPP

Výtěžnost DPP u této reakce byla pouze 5 – 20 %. Později byla publikována spousta dalších metod k cílené syntéze DPP pigmentu, příkladem může být syntéza z diesteru kyseliny jantarové v přítomnosti silné báze. Další způsoby syntézy této látky, lze najít v literatuře.²⁶

DPP je vysoce stabilní, pevná, červená látka s malou rozpustností. Po rozpuštění dává žlutý, lehce nazelenalý transparentní roztok.

Syntéza derivátů substituovaných na aromatické jádro je možné za použití aromatických nebo heterocyklických derivátů benzonitrilu. Mimo aromatické jádro je možné použít nukleofilní nebo elektrofilní substituce (viz Obr. 9).²⁷ Polární substituenty mohou změnit

přerozdelení elektronové hustoty, čímž se významně ovlivňuje absorpční i fluorescenční vlastnosti.²⁸



Obr. 9 Struktura diketopyrrolopyrolu s možnými reakčními centry²⁹

2.3.1 Použití

V roce 1986 byl na trh uveden první pigment DPP. Od té doby byla připravena a uvedena na trh spousta dalších pigmentů vycházejících z původní struktury DPP, jež našla uplatnění v mnoha aplikacích jako je barvení tkanin, plastů či součástí inkoustů. V několika posledních letech se zvyšuje zájem o tyto pigmenty a objevují se další patenty v nejrůznějších oblastech.

V posledních letech bylo Výzkumným ústavem organických syntéz připraveno množství derivátů DPP. Jelikož je možné syntetizovat velké množství různých derivátů, prostřednictvím velkého spektra substituentů, lze vytvářet deriváty s vlastnostmi „na míru“. Vedle změny barvy, je možné vytvořit i lépe rozpustnou formu.

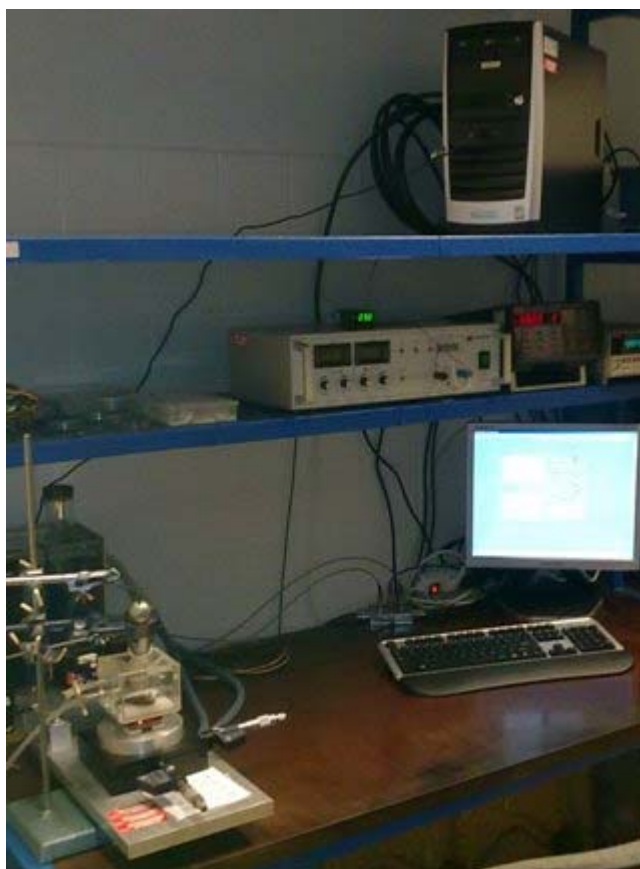
Vysoká stálost DPP pigmentů je způsobena vodíkovými vazbami a π -elektronovým překryvem. Proto jsou tyto pigmenty uplatňovány v těch nejnáročnějších aplikacích, jako je například automobilový průmysl nebo barvení vysokomolekulárních látek. Vedle těchto uplatnění, nalézají DPP pigmenty i uplatnění v elektronice. V 80. letech minulého století byla u této skupiny materiálů popsána děrová vodivost. Běžná děrová vodivost v DPP pigmentech se pohybovala v řádech 10^{-7} až 10^{-5} cm^2/Vs . V některých derivátech byla později popsána děrová vodivost až $0,7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.³⁰

Jelikož se jedná o barviva a pigmenty, je snaha o jejich využití v barvivech senzibilizovaných solárních článků. V těchto člancích DPP nezaujímá funkci samostatného polovodiče, ale pouze barviva, které absorbuje fotony a dodává elektrony do vodivostního pásu TiO_2 . Účinnost přeměny sluneční energie se u tohoto typu článku pohybuje jen něco málo přes 4 %.³¹ I přes vysokou fotostabilitu a absorpční koeficient nedochází k dostatečně účinnému přenosu elektronů do vodivostního pásu oxidu titaničitého, avšak je do této oblasti vkládána naděje, jelikož různé vlastnosti je možné upravovat syntézou nových derivátů.³²

I když je výchozí sloučenina DPP vysoce stabilní, některé deriváty mohou být záměrně syntetizovány s citlivostí na okolní prostředí, například pokud je DPP pozměněn dusíkatými substituenty, objevuje se citlivost na vodík a je možné jej využít pro vodíkový senzor.³³

2.4 Aparatura

Aparatura pro měření voltampérových charakteristik a výpočtu pohyblivosti nosičů náboje z tranzistoru řízeného elektrickým polem byla navržena a postavena na Fakultě Chemické VUT v Brně. Tato aparatura se skládá ze statické a elektrotechnické části. Statická část byla navržena v souladu se standardy a s ohledem na výzkumnou činnost prováděné na této aparatuře. Aparatura je určena pro měření komerčního typu substrátu TFT s dolní gate elektrodou a souborem 16 FETů s různou orientací a vzdáleností hřebenových elektrod. Celý měřicí prostor (pracoviště) i se statickou elektrotechnickou částí je vidět na Obr. 10.

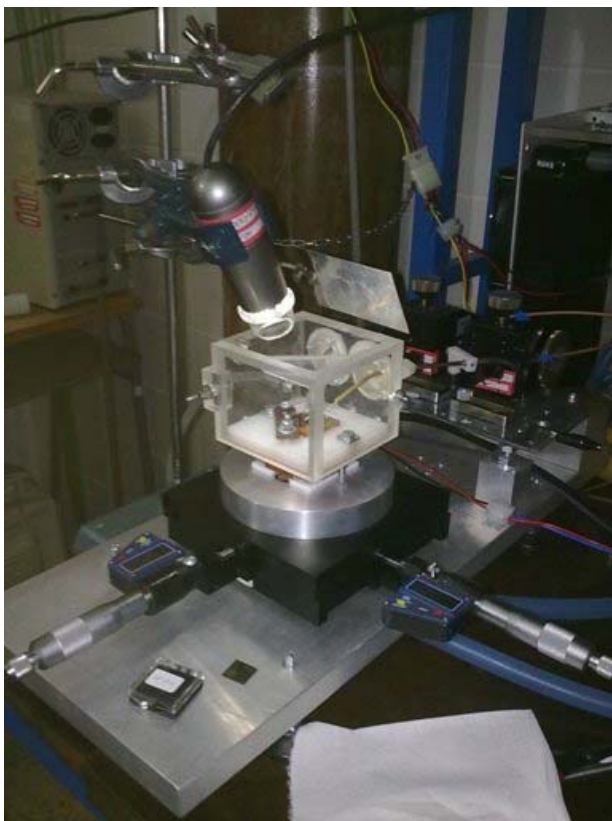


Obr. 10 Pracoviště pro měření FETů

2.4.1 Statická část

Statickou část tvoří samotná aparatura, kam se vkládá připravený vzorek FETu a ke kterému se kontaktují jehlové elektrody. Jelikož je vzorek OFETu tvořen souborem 16-ti samotných FETů, je aparatura opatřena 2D posuvným stolem a dvěma mikro-posuvnými jehlovými elektrodami. Pro lepší kontaktování jehlových elektrod je součástí aparatury i USB mikroskop. Aparatura je dále opatřena průhlednou celou pro udržení dusíkové atmosféry. Součástí statické části je i chlazení, či ohřev FETu pomocí dvou Peltierových článků a

zároveň chladicí/ohřívací kapalinové jednotky, která musí být součástí pro správnou funkci Peltierových článků. Na Obr. 11 je vidět statická část aparatury.



Obr. 11 Statická část aparatury

2.4.2 Elektrotechnická část

Elektrotechnická část aparatury je tvořena dvěma Keithley přístroji, jedním PID regulátorem NEWport, samostatným zdrojem napětí STATRON pro funkci Peltierových článků, osobním počítačem a programem vytvořeným v LabVIEW.

Keithley 617 slouží pro nastavování napětí na gate elektrodě. Tento přístroj je opatřen GPIB portem pro komunikaci s dalšími přístroji a napěťový rozsah je $\pm 104,5$ V.

Keithley 6487 má dvojí funkci. Jednou je nastavováno napětí mezi S a D elektrodou a druhou se měří protékající elektrický proud mezi S a D elektrodou. Napěťový rozsah je u tohoto typu přístroje ± 500 V. Oba přístroje Keithley mají společnou elektrodovou zem, kterou může být S nebo D elektroda. Přístroj je také opatřen GPIB portem a oba tyto přístroje jsou spojeny s osobním počítačem.

PID regulátor NewPORT reguluje teplotu pomocí tepelného snímače a výstupního napětí. Jelikož výstupní výkon tohoto regulátoru není dostatečný pro ovládání Peltierových článků, je tento problém vyřešen spojením se samostatným zdrojem STATRON. S osobním počítačem komunikuje tento regulátor pomocí RS232 sériové linky.

Všechny výše zmíněné přístroje z elektrotechnické části jsou ovládány pomocí vytvořeného ovládacího panelu v grafickém programovacím prostředí LabVIEW. Pro ovládání přístrojů je nutné znát komunikační protokoly a parametry komunikace.

Toto uskupení přístrojů a ovládacího panelu je příkladem virtuální instrumentace (vytváření přístroje tzv. „na míru“).

2.4.2.1 GPIB

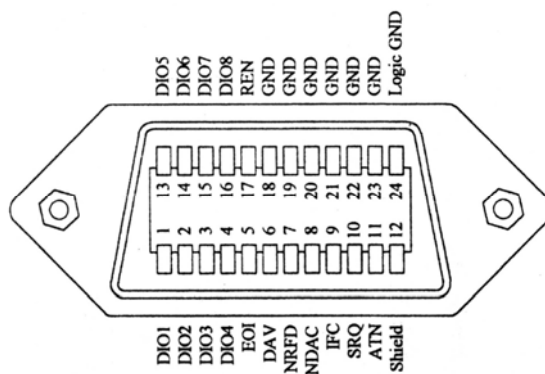
GPIB sběrnice nebo taky často zvaná IEEE 488, HP-IB (Hewlett Packart IB) nebo také IMS (International Measurement Systém) je rozhraní pro měřicí a zkušební přístroje, v kterém je možný přenos dat mezi dvěma nebo více přístroji.

Základy této sběrnice se počítají do 70. let minulého století, kdy HP přišlo se standardní sběrnici, která měla pomoci s jejich vlastním laboratorním zařízením. Později byla označena jako IEEE sběrnice. Původně byla vyvinuta za účelem spojení a podpory širokého rozsahu přístrojů a zařízení od velmi rychlých až po ty nejpomalejší.³⁴

Největšími výhodami této sběrnice je výkon, spolehlivost a produktivita.³⁵ Pomocí tohoto rozhraní lze spojit až 15 zařízení na vzdálenost až 20 metrů. Maximální vzdálenost mezi dvěma zařízeními může být 2 metry, respektive každému zařízení přísluší 2 metry, tedy maximální délka může být až 4 metry. S rozšiřovačem GPIB, lze zvětšit vzdálenost na více než 20 metrů (až 100m a počet zařízení až na 30).³⁶

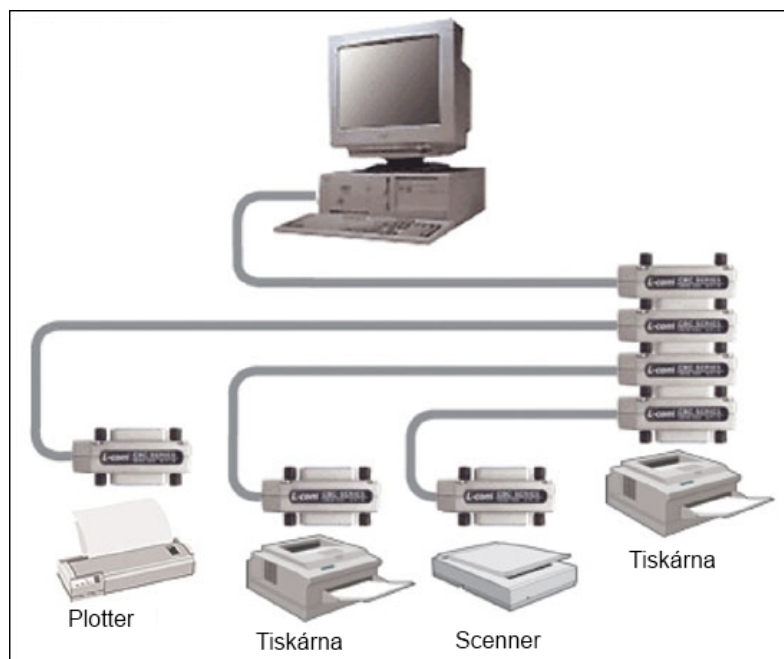
Informace jsou přenášeny po sběrnici po bytech (8bitů) s maximální přenosovou rychlostí 1 MB/s pro sběrnici 488.1. U novější vývojově vyspělejší sběrnice 488.2 dosahuje přenosová rychlost až 8 MB/s. Maximální rychlost je hlavně závislá na počtu připojených zařízení a celkové vzdálenosti.

Sběrnice obsahuje 24 vodičů (viz. Obr. 12), z toho 8 datových (DIO1-8), 3 pro řízení přenosu dat (DAV, NRFD, NDAC), 5 pro vysílání zpráv po jednom vodiči (ATN, IFC, REN, SRQ, EOI) a 8 zemnicích vodičů (GND).³⁷

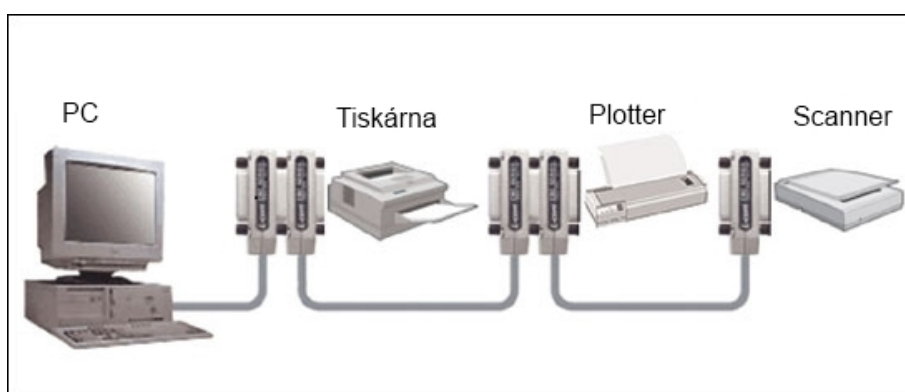


Obr. 12 Popis vodičů GPIB sběrnice³⁸

Zapojení přístrojů dle principů zapojení IT technologie je možno provést do hvězdice, lineárně nebo kombinaci obojí. Příklady těchto zapojení je vidět na Obr. 13 a Obr. 14.



Obr. 13 Zapojení GPIB sběrnice do hvězdice³⁹



Obr. 14 Zapojení GPIB sběrnice za sebou.

2.4.2.2 RS232

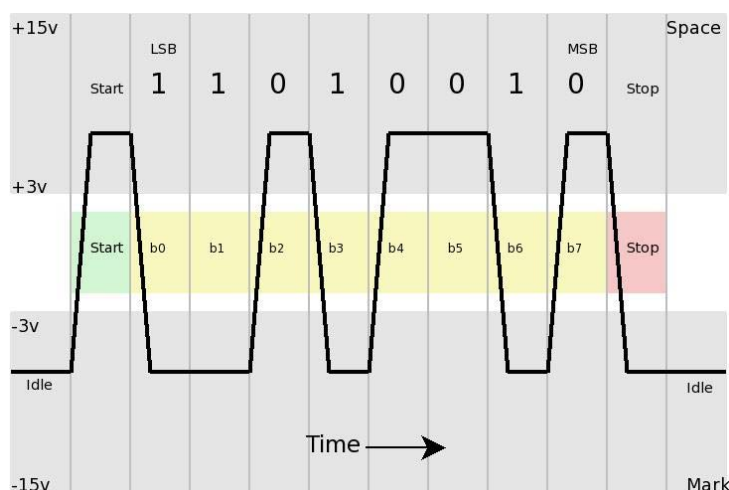
RS 232 je označována jako „sériová linka“ nebo taky „sériový port“. Základním kritériem sériové komunikace je, že k přenosu dat se využívá jedna linka (vodič) po níž se informace (datové bity) posílají jeden za druhým. Pro komunikaci mezi dvěma přístroji, resp. přístrojem a osobním počítačem (personal computer – PC) stačí 3 vodiče. Jedna linka, po níž se vysílají bity od PC k přístroji, druhá od přístroje k PC a třetí pracovní zem. Takže komunikace po jedné lince probíhá zpravidla změnou napětí, které představují dva základní stavy 0 a 1.⁴⁰ Nastavení dvou napětíových úrovní je různá. Základními hladinami, které se při napětím řízené regulaci využívají, jsou ± 5 , 10, 12 voltů. Zde například +10 voltů představuje logickou 0 a -10 voltů logickou 1. Vysílač, respektive přístroj, který vysílá data, může mít nastavené přesné napětí a přijímač na dané úrovni napětí získává. Přijímač může přijímat větší rozsah napětí, takže nedochází k ovlivnění přenosu dat rušivými vlivy. Velikost rozsahu napětí vysílače a přijímače lze vidět v Tabulka 2.

Tabulka 2 Napětí datových signálů

| Datové signály | | |
|----------------|---------------|---------------|
| Úroveň | Vysílač | Přijímač |
| Logická 0 | +5 V to +15 V | +3 V to +25 V |
| Logická 1 | -5 V to -15 V | -3 V to -25 V |
| Nedefinovaný | | -3 V to +3 V |

Přenos dat tedy spočívá změnou napětí v čase. Takto může probíhat synchronní nebo asynchronní přenos dat. Synchronní přenos dat je takový, kde je na vodiči nebo vodičích nastavena určitá úroveň, která nese informace, a validita se potvrdí impulzem nebo změnou signálu. Asynchronní přenos dat se přenáší v sekvencích. Data se přenášejí přesnou rychlostí a mají startovací a ukončovací sekvenci, na kterou se přijímač synchronizuje. Port RS232 používá asynchronní přenos dat.

Port RS232 má i další linky, které mají další funkce jako zapnutí vysílacího zařízení, připravenost k vysílání dat, připravenost k provozu, úroveň vysílacího signálu, koncové zařízení připraveno a zvonek. Tyto další linky se označují jako řídicí linky, jelikož se uplatňují při potvrzování přenosu dat. Příkladem takového přenosu dat můžeme vidět na Obr. 15.



Obr. 15 Asynchronní přenos dat⁴¹

Nevýhodou tohoto rozhraní je, že pro komunikaci s dalším zařízením je potřeba dalšího portu. Tedy i zvyšující se náklady pro připojení dalšího zařízení. Další nevýhodou může být i pomalá rychlost přenosu. Naopak výhodou může být vzdálenost mezi dvěma připojenými přístroji až 1200 metrů.⁴²

2.4.3 Komunikační protokoly

Dalším důležitým bodem je komunikační protokol, to znamená data (znaky) a základní nastavení portu, kterými se přístroje ovládají a komunikují s PC. Tyto protokoly lze nalézt v manuálech jednotlivých přístrojů.

2.4.3.1 Keithley 6487 a 617

Keithley 617 má pouze GPIB port. Keithley 6487 má port GPIB a RS232. Keithley 617 má již továrně přednastavený komunikační jazyk DDC. Keithley 6487 má možnost na výběr ze tří komunikačních jazyků. DDC, IEEE488 a SCPI. Pro zajištění homogenity, kvality a výkonu byl vybrán pro komunikaci s Keithley 6487 a 617 port GPIB. Kvůli velké podobnosti komunikačního jazyku DDC mezi Keithley 617 a 6487, byl vybrán pro komunikaci s těmito přístroji právě DDC jazyk.^{43,44}

Jelikož IEEE488 port má hardwarově a vývojově řešené nastavení portu, usnadňuje se práce na tvorbě komunikace mezi přístroji. Proto se komunikační protokol omezuje pouze na ovládací signály.

Komunikační zprávy pro Keithley 617

Tento přístroj slouží pro nastavování napětí na bázi (gate elektrodě), takže je potřeba pouze příkazů pro nastavování a čtení napětí. Jazyk DDC umožňuje řadit jednotlivé pokyny pro nastavení a odečtení za sebe v jednom požadavku. Následující Tabulka 3 ukazuje vybrané souhrnné příkazy. Jednotlivé samostatné příkazy lze dohledat v manuálech přístroje.

Tabulka 3 Komunikační zprávy pro Keithley 617

| Druh zprávy | znaky zprávy |
|-------------------------|---------------|
| Nastavení zdroje napětí | D1T0O0102.4VX |
| Čtení napětí | D1B4G1T0X |

Komunikační zprávy pro Keithley 6487

U tohoto přístroje je potřeba nejen řídit zdroj napětí mezi emitorem a kolektorem, ale také čtení elektrického proudu mezi nimi. DDC jazyk u tohoto přístroje je novější a liší se v několika málo příkazech. Samozřejmostí pro novější typ přístroje je i větší rozsah příkazů a hlavní předností platí stejně jako u předchozího jazyku DDC, že lze řetězit příkazy za sebe. Následující Tabulka 4 ukazuje již zřetěžené souhrnné příkazy. Jednotlivé příkazy lze také dohledat v manuálech pro tento přístroj.

Tabulka 4 Příkazy pro Keithley 6487

| Druh zprávy | znaky zprávy |
|---------------------------|-----------------|
| Nastavení zdroje napětí | T0O0V102.4,0,0X |
| Čtení napětí | T1U8X |
| Změna rozsahu | R0C2X |
| Automatická nula | H30X |
| Kontrola nuly | C0X |
| Čtení elektrického proudu | B0G1T0X |

2.4.3.2 PID regulátor NEWport

Tento regulátor spolu se zdrojem napětí STATRON dokáže po nastavení hodnoty regulovat zdroj napětí, respektive výstupní výkon zdroje STATRON. Výkonem říditelného zdroje a polaritou přiloženého napětí na Peltierovy články umožňuje ohřívat, či ochlazovat vzorek.

Tento regulátor, lze řídit pomocí PC pouze pomocí sériového portu RS232. U tohoto portu je nutné nastavovat parametry portu.⁴⁵ Toto nastavení, lze vidět v Tabulka 5 a komunikační příkazy v Tabulka 6.

Tabulka 5 Nastavení portu RS232 pro NewPort

| | |
|-----------|------|
| baud | 9600 |
| data bitů | 7 |
| parita | odd |
| stopbit | 1 |

Tabulka 6 Příkazy pro NewPort

| Druh zprávy | znaky zprávy |
|-----------------------------|--------------|
| Nastavení regulační hodnoty | *W012000\r\n |
| Čtení regulační hodnoty | *R01\r\n |
| Čtení aktuální hodnoty | *X01\r\n |

2.4.4 Virtuální instrumentace

Zakladatelem této moderní oblasti je James Truchard, který spolu s kolegy pracovali na vývoji aplikací sonaru pro americké námořnictvo. Při tomto projektu s kolegy řešil vhodné připojení testovacího zařízení k počítači DEC PDP-11 a výsledkem této činnosti byla myšlenka „virtuální instrumentace“.⁴⁶ Virtuální instrumentace nebo také virtuální měřicí systém je kombinace hardwaru a softwaru. Na základě jakéhokoliv univerzálního hardwaru a odpovídajícího softwaru lze vytvářet přístroje a měřicí systémy s definovanými vlastnostmi uživatele. Takto uživatel není omezen na funkce implementované výrobcem do přístrojů. Za podmínek, že nároky na hardware se nezmění, je změna funkcí na úrovni software, tzn. snadnou změnu vlastností a funkcí přístroje a minimální dodatečné náklady. Samozřejmě, že nejen software by měl být flexibilní, ale i hardware. Různé aplikace si vyžadují i rozdílný přístup. Pomocí virtuálního přístroje lze lépe využít hardware, než ekvivalentu přístroje průmyslově dodávaným výrobcem. Hlavním cílem virtuální instrumentace je dočasně, nebo i trvale nahradit prostorově, finančně a časově náročné využití technických prostředků. Srovnání vlastností virtuálního přístroje a klasického přístroje je vidět v Tabulka 7.

Tabulka 7 Srovnání vlastností přístrojů

| Klasický přístroj | Virtuální přístroj |
|---|---|
| Funkce definuje výrobce | Funkce definuje uživatel |
| Specificky zaměřený systém, omezené možnosti digitální komunikace | Flexibilní systém s možností různých druhů digitální komunikace |
| Často jednoúčelový hardware | Univerzální hardware, roli hraje software |
| Vyšší náklady | Nízká cena za předpokladu změny softwaru a vícenásobného použití hardwaru |

V jakékoliv oblasti využití osobního počítače, stejně tak v oblasti virtuální instrumentace platí heslo „software je klíč“. Pro návrhy a realizaci jednoduché řízení experimentu a sběru dat existují programy jako EFLAB, ControlWEB nebo LabVIEW.

2.4.5 LabVIEW

Programovací a vývojové prostředí LabVIEW je z anglického spojení *Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench* neboli laboratorní pracoviště virtuálních přístrojů. Za zakladatele LabVIEW je považován Jeffrey Kodosky a je produktem americké firmy National Instruments. Na počátku LabVIEW byla představa, aby jakýkoliv technik, který dokáže své poznatky a požadavky zapsat do blokového diagramu mohl podobně intuitivně vytvořit program. Vzniklo tak prostředí, které místo textového programování umožňuje snadno a rychle tvořit programy v grafické podobě. Program LabVIEW obsahuje různé funkce, které jsou reprezentovány ikonami. Tyto ikony lze vzájemně spojovat virtuálními vodiči a výsledek ukládat do souborů nebo vykreslovat do grafu. Labview je v podstatě blokový grafický programovací jazyk, který je založen na toku dat, to znamená, že nejprve dělá úkon jedna ikona a poté další ikona. Toto umožňuje více-vláknovou (virtuální vodiče) architekturu. Další výhodou tohoto prostředí je vytváření vlastních ikoněk neboli podprogramů nazývané SubVI. Toto programovací prostředí se neustále vyvíjí a s nadsázkou lze říct, že využití je neomezené.

2.4.5.1 Princip programování

Programování v LabVIEW je rozděleno do dvou oken. V prvním okně nebo taky v předním (čelním) panelu se nachází oblast pro vizualizaci dat, ovládací prvky programu a samotné uživatelské prostředí. V druhém okně tzv. pozadí nebo taky background se odehrává nejpodstatnější část programování. Každý ovládací prvek v čelním panelu má ikonu v backgroundu. Z tohoto hlediska lze rozdělit ovládací prvky na kontroléry, pomocí kterých můžeme ovládat vstupní parametry, potom indikátory, které „ukazují“ výsledky vytvořených aplikací a samozřejmě taky konstanty, které jdou vidět pouze na pozadí a reprezentují konstantní hodnoty kontrolérů.⁴⁷

Dalšími a v podstatě nejdůležitějšími prvky jsou samotné ikony, které reprezentují tu danou aplikaci, či úkon, kterou uživatel potřebuje k sestrojení vlastního programu. Mezi tyto ikony patří samozřejmě nejen jednoduché prvky jako sčítání, odečítání, atd., ale i více sofistikované prvky. Příkladem takovýchto složitějších ikon může být ikona pro PID regulaci, nebo expresní funkce, které provedou uživatele od nastavení měření až po konkrétní měření.

Ovládací prvky a samotné užité ikony jsou spojovány „drátkem“, který reprezentuje tok dat z ovládacího prvku k ikoně nebo taky od ikony k ikoně. Tyto drátky mají barvu, tloušťku a grafiku podle toho jaký typ informace přenášejí. To samé platí i o barvě ovládacích prvků v backgroundu. Například celá čísla mají barvu modrou, kdežto reálná čísla mají barvu oranžovou, textové hodnoty mají růžovou barvu apod.

Samozřejmě pro složitější programování jen tyto ikony nestačí a v LabVIEW jsou další prvky označované jako „case“ prvky. Jedná se o smyčky, které mají předepsané funkce. Příkladem takové smyčky může být „while“ smyčka. U této smyčky probíhá opakovaně vytvořená aplikace, dokud není programem, nebo uživatelem řečeno, že se má smyčka zastavit. Spolu s dalšími smyčkami a výše zmíněnými prvky, lze vytvořit plnohodnotný měřicí systém přímo na míru pro daného uživatele. Pro snazší programování a celkovou přehlednost v backgroundu, lze vytvářet i vlastní ikony a programy.

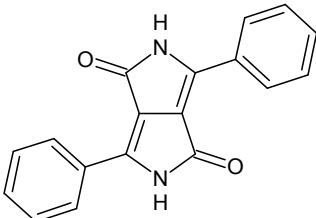
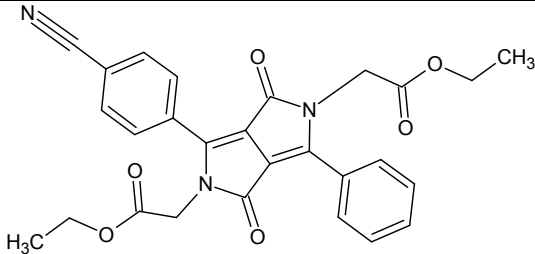
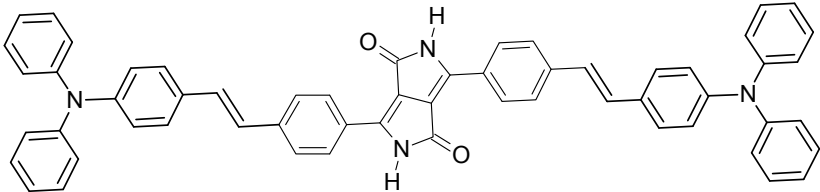
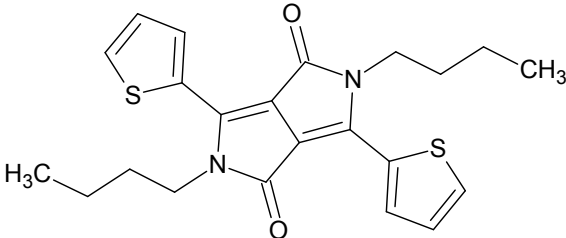
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Použité materiály a přístrojové vybavení

3.1.1 Vzorky

Pro testování tenkovrstvých elektrických vlastností DPP byly vybrány vzorky dle Tabulka 8, které byly vakuově napařeny na FETový substrát. Přípravu a čištění substrátu prováděla Bc. Anna Ivancová. Tenké vrstvy byly nanášeny vakuovým napařováním a byly připraveny panem doc. Ing. Otou Salykem, CSc. Tyto vzorky jsou označeny písmenem „U“ a přiřazeným číslem, jímž je daná organická látka označena. Dalším číslem je označen den vzniku tenké vrstvy, například 111011 je vzorek připravený 11. 10. 2011.

Tabulka 8 Soupis použitých vzorků

| Vzorek | Označení | Struktura |
|--------|----------|--|
| U04 | 111011 |  |
| U64 | 011211 |  |
| U68 | 240112 |  |
| U80 | 111111 |  |

Vedle označení vzorku a data vzniku tenké vrstvy je vidět i struktura použité látky. Vzorek U04 je označení základního DPP a vzorky U68 a U80 jsou již deriváty U04. U těchto vyjmenovaných látek byla pozorována děrová vodivost a tomu odpovídající výstupní i převodní charakteristika tranzistoru. Mezi vzorky je zařazen i U64, ovšem kvůli elektrickému svodu mezi G a S/D elektrodou a nebyl pozorován tranzistorový jev.

3.1.2 Zařízení

Při řešení této práce byly využity následující zařízení:

- PC vybavený komunikačním portem RS232 a GPIB rozhraním
- Keithley 6487, Keithley instruments, Inc.
- Keithley 617, Keithley instruments, Inc.
- PID regulátor iseries Newport
- Regulovaný napětím řízený zdroj stejnosměrného napětí STATRON
- Multimetr Metex M-3650D
- Uhlíkový gigaohmový odpor
- K-termočlánek (Metex)

3.1.3 Software

K tvorbě ovládacího programu automatizovaného systému a vyhodnocení dat byl použit software:

- National Instrument LabVIEW 2009
- Microsoft® Office Excel
- OriginPro 8

3.2 Digitální komunikace

Využívanou aparaturu uvedenou na obrázku 10 je v principu možné ovládat manuálně, nicméně nastavování obou napětí, odečet procházejícího proudu a to navíc v definovaném časovém režimu není v podstatě v lidských silách. Proto byly použité přístroje připojeny k osobnímu počítači a v rámci řešení této práce byl zhotoven program pro ovládání (nastavování) všech parametrů potřebných pro získání obou charakteristik FET struktury.

Digitální komunikace, jak už bylo zmíněno v teoretické části 2.4.3.1 je realizována propojením zařízení pomocí GPIB sběrnice. Pro komunikaci s PID regulátorem NEWport bylo použito redukčního kabelu USB na RS232. Takto připravené spojení přístrojů bylo nutné otestovat s ohledem na funkčnost datové komunikace a správnost nastavení portů RS232.

Pro testování komunikace všech přístrojů bylo nejprve zapotřebí nalézt specifikaci komunikačního protokolu a nastavení portu pro jednotlivé přístroje. Tyto informace byly nalezeny v manuálech jednotlivých přístrojů.

Správnost nastaveného napětí byla kontrolována pomocí multimetru Metex, velikost procházejícího proudu byla otestována pomocí známého napětí a do obvodu zapojeného gigaohmového odporu.

3.2.1 Komunikace Keithley 617

Pro komunikaci s Keithley 617 bylo použito GPIB sběrnice. U této sběrnice je výhoda, že nastavení portu je vyřešeno hardwarově a tudíž odpadá práce s nastavováním portu. Jak už bylo řečeno v teoretické části, přístroj komunikuje pomocí DDC jazyku. U tohoto jazyku je výhoda, že jednotlivé příkazy lze řetězit a k nastavení všech patřičných hodnot stačí jeden povel. Zřetěžený příkaz pro nastavení zdroje napětí a čtení nastaveného napětí jde vidět v Tabulka 3 a popis jednotlivých příkazů v následujících kapitolkách.

3.2.1.1 Popis zprávy pro nastavení napětí Keithley 617

Zřetězeným příkazem „D1T0O0102.4VX“ lze zapínat, nastavovat a měnit přiložené napětí na G elektrodu. Dále jsou popsány jednotlivé příkazy, tak jak jdou za sebou v řetězeném příkazu.

D1 je pokyn pro změnu modu přístroje. D tedy označuje mód a číslo za ním znamená, o jaký mód se jedná. Číslo 0 pro elektrometr a 1 pro zdroj napětí.

T je příkaz na trigger, což umožňuje spínání a měření v určitých časových intervalech, případně externím signálem a číslo za ním opět znamená, jaký typ má být nastaven. Je možné použít od čísla nula až po číslo 7. Číslo 0 označuje kontinuální typ, další už označují typy tzv. na požádání.

Příkazem O0 resp. O1 se vypíná nebo zapíná zdroj napětí. Tedy 0 pro vypnuto a 1 pro zapnuto. Dalším příkazem 102.4 V se nastavuje požadované napětí. Respektive číslo před „V“ označuje hodnotu napětí. Je možné nastavovat napětí od -102.35 až po +102.4 voltů s napěťovým schodkem 50 milivolt. Číslo v příkazu musí být s desetinou tečkou.

Znak X je ukončovací znak, který musí být za každým příkazem.

3.2.1.2 Popis zprávy pro čtení napětí Keithley 617

Význam D1 ve zřetězeném příkazu „D1B4G1T0X“ je popsán v předešlé kapitole. Příkaz B4 znamená příkaz pro čtení napětí, resp. „B“ je pro čtení a číslo za ním označuje, co má být čteno. Je možné nastavit čtení od 0 po 4, kde v řadě za sebou je elektrometr, čtení sběrnice, čtení maxima, čtení minima a zdroje napětí.

Příkazem G1 se nastavuje, v jakém datovém formátu má přístroj Keithley 617 odpovědět. Číslo za písmenem G opět znamená, o jaký datový typ se jedná. Pro 0 je odpověď s předponou „NDCV“, pro 1 bez předpony a pro 2 s předponou a velikostí zaplněné sběrnice. Tedy po příkaz G1 odpoví přístroj ve tvaru „-1.23456E+00“.

Příkaz T0 má stejný význam jako v předešlé kapitole.

3.2.2 Komunikace Keithley 6487

Komunikace mezi přístrojem a PC je uskutečněno také pomocí GPIB sběrnice. U tohoto přístroje je možné nastavit tři různé komunikační jazyky. První z nich je IEEE.488, druhý je SCPI a třetí DDC jazyk. Jelikož je DDC jazyk u tohoto přístroje podobný komunikačnímu jazyku pro Keithley 617, byl vybrán tento jazyk pro oba přístroje. Jednotlivé zřetězené zprávy jdou vidět v Tabulka 9.

Tabulka 9 Soubor zřetězených zpráv pro Keithley 6487

| Druh zprávy | znaky zprávy |
|---------------------------|-----------------|
| Nastavení zdroje napětí | T0O0V102.4,0,0X |
| Čtení nastaveného napětí | T1U8X |
| Změna rozsahu | R0C2X |
| Automatická nula | H30X |
| Kontrola nuly | C0X |
| Čtení elektrického proudu | B0G1T0X |

Protože rozsah popisu pro tyto příkazy je poměrně rozsáhlý, je popis jednotlivých příkazů zkrácen a uveden v Tabulka 10.

Tabulka 10 Jednotlivé samostatné příkazy

| Mód | Příkaz | | Popis |
|--------------------|--------|----|--|
| Čtení zdroje | B | 0 | Čtení pikoampérmetru |
| | | 1 | Čtení sběrnice (jednou za čas) |
| | | 2 | Čtení celé sběrnice |
| | | 3 | Čtení maxima ze sběrnice |
| | | 4 | Čtení minima ze sběrnice |
| Kontrola nuly | C | 0 | Vypnuta kontrola nuly |
| | | 1 | Zapnuta kontrola nuly |
| | | 2 | Zapnuta kontrola nuly a provedení správnosti nuly |
| Datový formát | G | 0 | Čtení ASCII s předponou (NDCA-1.23456E-02) |
| | | 1 | Čtení ASCII bez předpony (-1.23456E-02) |
| | | 2 | Čtení ASCII s předponou a s velikostí zaplněné sběrnice (pouze pro B1 a B2, NDCA-1.23456E-02,012) |
| | | 3 | Čtení ASCII bez předpony a s velikostí zaplněné sběrnice (pouze pro B1 a B2, NDCA-1.23456E-02,012) |
| | | 4 | Binární čtení (byte v obráceném pořadí) |
| | | 5 | Binární čtení (byte v normálním pořadí) |
| | | 6 | Binární čtení s exponentem (byte v obráceném pořadí) |
| | | 7 | Binární čtení s exponentem (byte v normálním pořadí) |
| Zmáčknutí* | H | 30 | Zmáčknout automatickou nulu (Autozero) |
| Zdroj napětí | O | 0 | Vypnutí zdroje napětí |
| | | 1 | Zapnutí zdroje napětí |
| Proudový rozsah | R | 0 | Zapnut automatický rozsah |
| | | 1 | 2 nA rozsah |
| | | 2 | 20 nA rozsah |
| | | 3 | 200 nA rozsah |
| | | 4 | 2 µA rozsah |
| | | 5 | 20 µA rozsah |
| | | 6 | 200 µA rozsah |
| | | 7 | 2 mA rozsah |
| | | 8 | 20 mA rozsah |
| | | 9 | 20 mA rozsah |
| | | 10 | Vypnut automatický rozsah |
| Spoušť (Trigger) * | T | 0 | Kontinuální, spuštění „hovorem“ |
| | | 1 | Jednou, spuštění „hovorem“ |
| Nastavení napětí | Vn,r,l | N | Hodnota napětí n = -505 až 505 V (s desetinou tečkou) |
| | | R | Rozsah r: 0 = 50V rozsah; 1 = 500V rozsah |
| | | L | Proudový limit l: 0 = 25 µA limit, 1 = 2.5 mA limit |
| Končící příkaz | X | | Musí být přítomen na konci každého souboru příkazu, i samostatných příkazů. |

* pro velký rozsah těchto příkazů, byl uveden jen omezený počet. Bližší informace lze najít v manuálu přístroje.

3.2.3 Komunikace PID regulátoru NewPort

Nastavení portu RS232 pro komunikaci s tímto přístrojem lze nastavit i přímo v regulátoru. Nutností je, aby PID regulátor a PC měli shodné nastavení.

Pro komunikaci byly nastaveny parametry portu podle Tabulka 5. Tabulka 11, Tabulka 12 a Tabulka 13 popisují jednotlivé příkazy. V Tabulka 14 je dále rozepsán způsob, jakým je označena desetinná čárka (tečka) a kladná či záporná hodnota pro nastavení a odečet regulační hodnoty.

Tabulka 11 Komunikační zpráva „nastavení regulační hodnoty“.

| | | | | | |
|---|----------------|-----------------------------------|--|-------------------------------------|-----------------|
| Zpráva pro nastavení regulační hodnoty: *W01203E8\r\n | | | | | |
| * | W | 01/02 | 2 | 03E8 | \r\n |
| úvodní znak | Zápis | Nastavení spodní/horní hodnoty | Nastavení desetinné čárky a znaménka ± | Čtyřmístná hodnota v hexakódu | konec zprávy |
| Odpověď regulátoru: W01\r\n | | | | | |
| W | 01 | \n | | | |
| zapsáno | status příkazu | konec zprávy | | | |

Tabulka 12 Komunikační zpráva „čtení nastavené hodnoty“.

| | | | | |
|--|----------------------|---------------------------------------|--------------------------------|--------------|
| Zpráva pro čtení nastavené hodnoty: *R01\r\n | | | | |
| * | R | | 01/02 | \r\n |
| úvodní znak | Čtení | | Nastavené spodní/horní hodnoty | konec zprávy |
| Odpověď regulátoru: R01203E8\r\n | | | | |
| R | 01/02 | 2 | 03E8 | \n |
| Odečet | Spodní/horní hodnoty | Umístění desetinné čárky a znaménka ± | Čtyřmístná hodnota v hexakódu | konec zprávy |

Tabulka 13 Komunikační zpráva „čtení aktuální hodnoty“

| | | |
|--|--|--------------|
| Zpráva pro čtení aktuální hodnoty: *X01\r\n | | |
| * | X01 | \r\n |
| úvodní znak | Čtení aktuální hodnoty | konec zprávy |
| Odpověď regulátoru: X01075.4\n (pro hodnotu 75,4 °C) | | |
| X01 | 075.4 | \n |
| úvodní znak, délka zprávy, číslo přístroje | Aktuální hodnota v ASCII znacích s desetinou tečkou | konec zprávy |

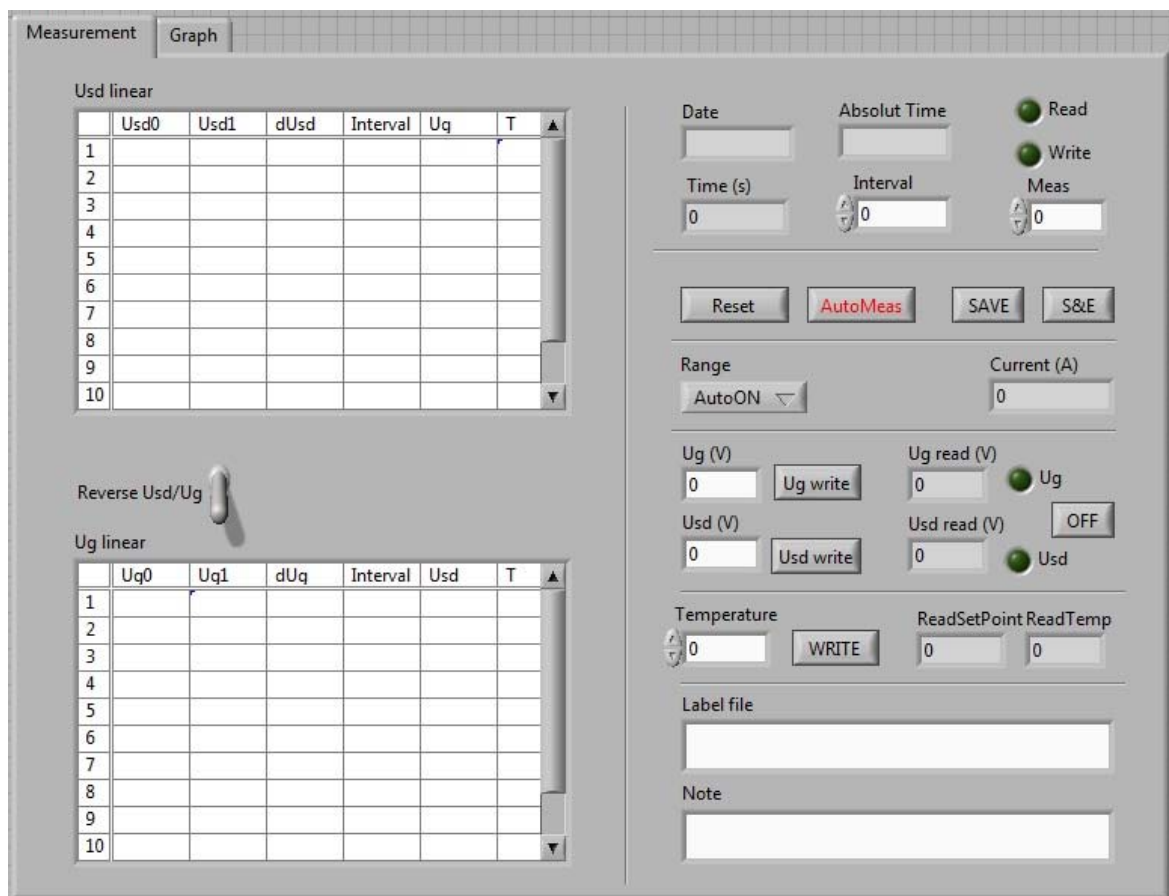
Tabulka 14 Umístění desetinné čárky (tečky) a znaménka \pm

| Znaménko | Umístění desetinné čárky. | Binární zápis | ASCII znak |
|----------|---------------------------|---------------|------------|
| + | Nepovoleno | 0000 | 0 |
| | NNNN. | 0001 | 1 |
| | NNN.N | 0010 | 2 |
| | NN.NN | 0011 | 3 |
| | N.NNN | 0100 | 5 |
| - | Nepovoleno | 1000 | 8 |
| | NNNN. | 1001 | 9 |
| | NNN.N | 1010 | A |
| | NN.NN | 1011 | B |
| | N.NNN | 1100 | D |

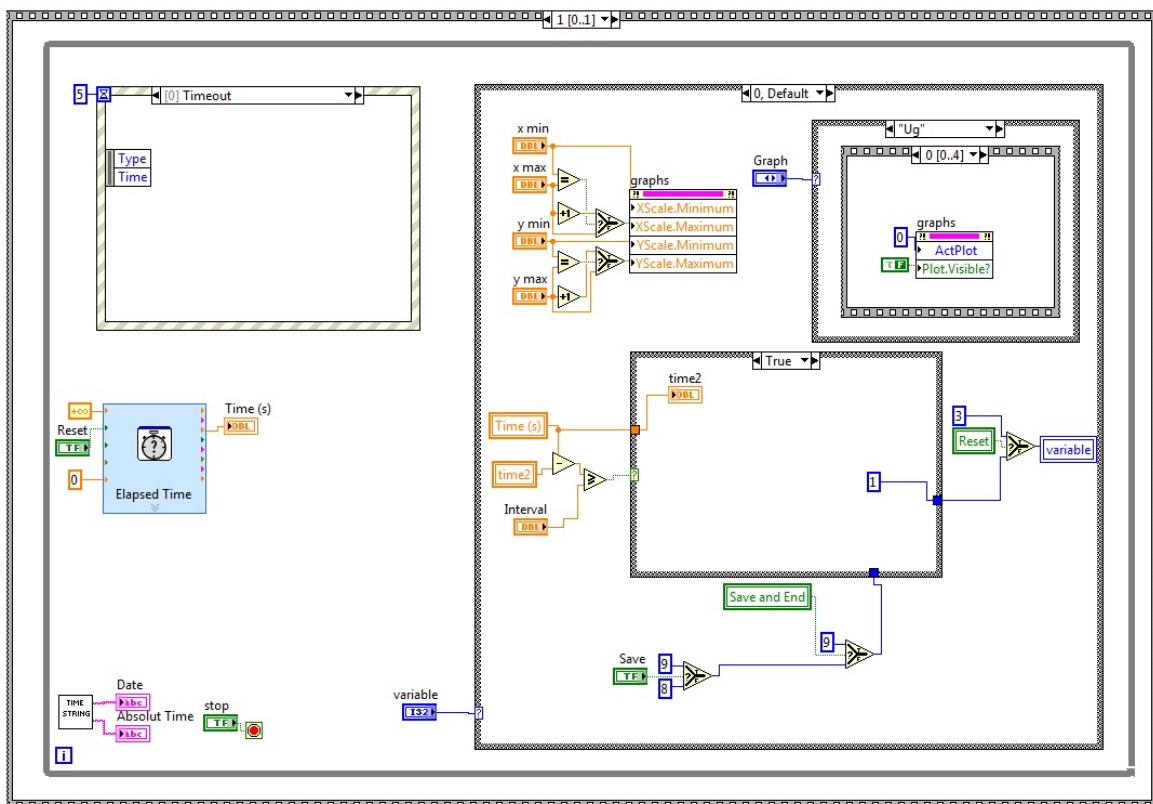
3.3 LabVIEW

Po ověření nastavení portu a komunikačních zpráv byla rozdělena komunikace s přístroji do několika základních bodů a byly vytvořeny pro jednotlivé části podprogramy zvané subVI. Následně byly jednotlivé komponenty zapojeny do celkového programu, jehož uživatelský panel je uveden na Obr. 16 a okno s algoritmem na obrázku Obr. 17.

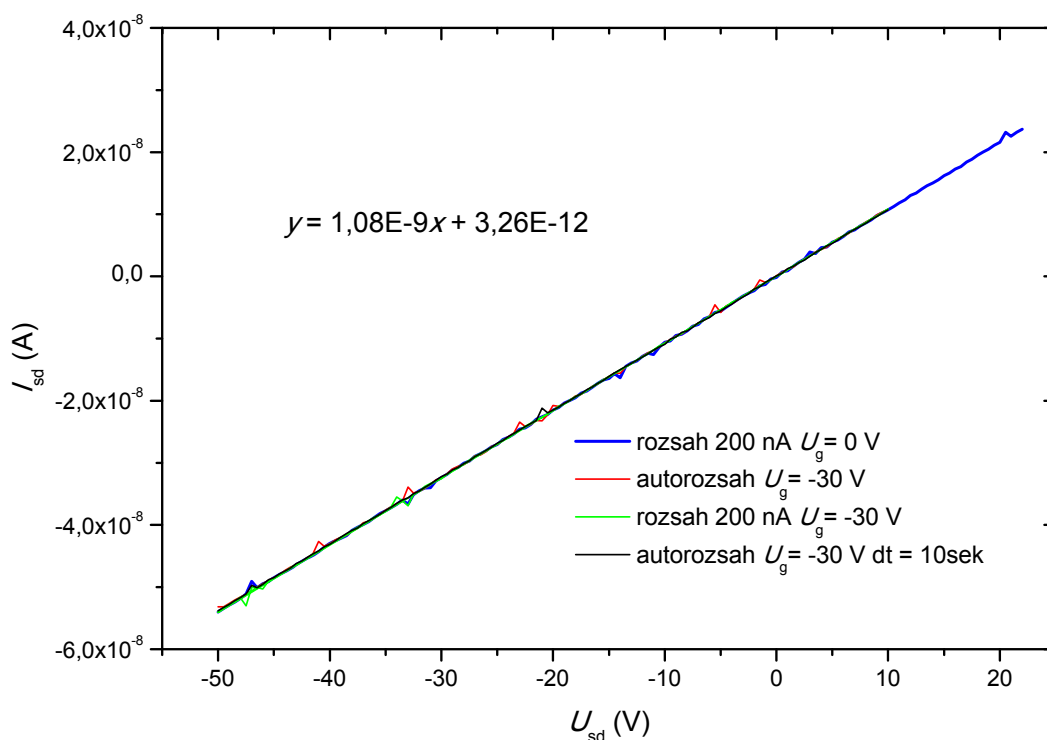
Ovládací panel je rozdělen záložkami na prostor pro nastavení měření a prostor pro vykreslování naměřených dat do grafu. Prostor pro nastavení měření je dále rozdělen na dvě části. V levé části jsou umístěny 2 tabulky, do kterých se před vlastním měřením definují parametry měření. Druhá část slouží k obsluze zařízení, kde je možno upravovat a nastavovat měření manuálně, dále sledovat odečítané hodnoty z přístrojů a další. Měření podle předem nastavených parametrů probíhá až po stisknutí tlačítka „AutoMeas“. Popis ovládání programu je popsán v odstavci výsledky a diskuze.



Obr. 16 Čelní panel vytvořeného programu.



Obr. 17 Zadní panel vytvořeného programu.



Obr. 19 Ověřovací charakteristika referenčního měření na rezistoru 1 GΩ.

Jednotlivé křivky mají zanedbatelné odchylky způsobené zřejmě vodivostí okolního vzduchu. Kolem hodnoty $U_{sd} = -32,5$ V se vyskytuje u všech křivek malá skoková změna proudu. Tento jev byl způsoben naprogramovanou změnou napěťového rozsahu při hodnotě $\pm 32,5$ V z 50 voltového rozsahu na 500 voltový rozsah. Tato malá chyba byla opravena a změna napěťového rozsahu byla upravena tak, aby probíhala při napětí ± 50 V. Správná orientace křivek, respektive směrnice přímků ukazuje správné zapojení elektrického obvodu. Kontrola odporu byla provedena multimetrem. Změna časového intervalu mezi změnou napětí a odečtem elektrického proudu nemá negativní vliv na výslednou charakteristiku.

3.4.2 Ověření multimetrem Metex

Hodnoty nastavovaných napětí byly prověřeny multimetrem a shoda nastaveného a kontrolovaného napětí byla s přesností na setinu voltu jak pro napětí mezi S a D elektrodou tak i pro napětí na G elektrodě.

Dále byla multimetrem a připojeným termočlánkem ověřena teplotní regulace. Při tomto ověřování bylo potřeba malé časové rezervy pro odečet teploty z důvodu temperace na požadovanou hodnotu. Praktickým odměřením byla zjištěna spodní hranice -20 °C, kterou je možné nastavit a horní nemohla být přesně odměřena, protože Peltierovy články mají teplotní rozsah použití jen do 225 °C. I přes to byla spolehlivě regulována hodnota 150 °C.

Multimetrem byl odměřen i gigaohmový odpor. Měřením byla zjištěna hodnota 914 MΩ. Jelikož multimetr při maximálním rozsahu 2 GΩ má přesnost 5 %, lze usuzovat, že odměřené hodnoty v Obr. 19 jsou správné.

4 VÝSLEDKY A DISKUZE

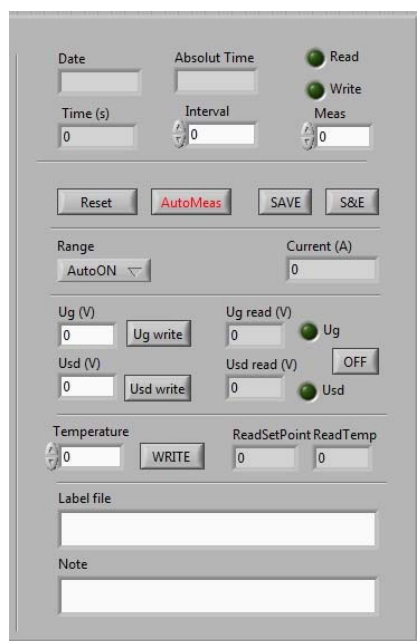
4.1 Program MeasFET

Strukturu vytvořeného algoritmu a čelní obslužný panel lze vidět na Obr. 16 a Obr. 17. Čelní panel je možné pomyslně rozdělit do tří částí. První z nich je manuální nastavování (měření), další tabulky pro automatické měření výstupní a převodní charakteristiky a třetí je vykreslování dat do grafu.

Při spuštění vytvořeného algoritmu se otevře okno LabVIEW s čelním panelem algoritmu. Pro správnou funkci tohoto algoritmu je zapotřebí mít zapnuté přístroje Keithley 6487 a 617. Dále, pokud bude chtít obsluha měřit i za různé teploty, musí zapnout i externě řízený zdroj napětí STATRON. Spuštění algoritmu se provádí tlačítkem se značkou jednoduché šipky, kterou je možné najít v levé horní části okna LabVIEW.

4.1.1 Manuální měření

Po spuštění algoritmu se provede automaticky kontrola přístroje Keithley 6487, který se přepne se do měřicího režimu a vytvořený program již běží v režimu manuálního ovládání. Při tomto měření se odečítá proud v přesném časovém intervalu, který lze měnit ikonou „Interval“ v pravé části čelního panelu, který můžeme vidět na Obr. 20.



Obr. 20 Čelní panel manuálního ovládání.

Nad první čarou lze vidět ikony spojené nepřímo s měřením, tedy aktuální datum a čas, čas od počátku měření a stav, zda probíhá zapisování nebo čtení z přístrojů. V této oblasti je ikona „Meas“ která udává, kolik za sebou jdoucích hodnot proudu má být odečteno (pro průměrování a zmenšení odchylky proudu). Standardně je nastaven interval mezi dvěma měřeními proudu na 2 sekundy a měření pouze jedné hodnoty.

Pod touto oblastí jsou čtyři tlačítka. Tlačítko „Reset“ vymazává data z paměti programu a grafu. Tlačítkem „AutoMeas“ se spouští automatické měření. Dalším tlačítkem „SAVE“ se průběžně ukládají data a posledním tlačítkem „S&E“ se uloží data, ukončí se automatické

měření a resetují se data z paměti programu. Všechna data se ukládají na plochu obrazovky ve formátu „xls“. Popisek k souboru lze uvést v kolonce „Label file“. Za tento popisek je automaticky vkládán datum a čas měření. V kolonce „Note“ je možné vkládat popisek, který bude na prvním řádku uloženého souboru.

Rozbalovací ikonkou „Range“ se mění měřicí rozsah pikoampérmetru a odečítané hodnoty jsou vypisovány do kolonky „Current (A)“

Dále jsou ikony pro nastavování napětí. Napětí je nastaveno až po zmáčknutí tlačítka „Ug write“ nebo „Usd write“. Tlačítkem „OFF“ se vypínají zdroje napětí obou přístrojů Keithley.

Poslední částí manuálního ovládání je nastavování regulované teploty měřeného vzorku „Temperature“, které se potvrzuje tlačítkem „Write“.

4.1.2 Automatické měření

Spuštění automatického měření se provádí tlačítkem „AutoMeas“. Automatické měření je prováděno podle předem vyplněných hodnot parametrů v tabulkách (viz Obr. 21).

| Usd linear | | | | | | |
|------------|------|------|------|----------|-----|---|
| | Usd0 | Usd1 | dUsd | Interval | Uq | T |
| 1 | 0 | -60 | 1 | 1 | 0 | |
| 2 | | | | | -10 | |
| 3 | | | | | -20 | |
| 4 | | | | | -30 | |
| 5 | | | | | -40 | |
| 6 | | | | | -50 | |
| 7 | | | | | -60 | |
| 8 | | | | | | |
| 9 | | | | | | |
| 10 | | | | | | |

Reverse Usd/Ug

| Ug linear | | | | | | |
|-----------|-----|-----|-----|----------|-----|---|
| | Uq0 | Uq1 | dUq | Interval | Usd | T |
| 1 | 0 | -60 | 1 | 1 | -15 | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| 6 | | | | | | |
| 7 | | | | | | |
| 8 | | | | | | |
| 9 | | | | | | |
| 10 | | | | | | |

Obr. 21 Tabulky pro automatické měření výstupní a převodní charakteristiky

V tabulkách jsou sloupce, které reprezentují daný parametr. První tabulka slouží pro měření výstupní charakteristiky. Sloupce „Usd0“ a „Usd1“ určují rozsah hodnot napětí, při kterém má probíhat automatické měření. V sloupci „dUsd“ je udáván napěťový krok, jež má být uskutečněn mezi „Usd0“ a „Usd1“. V sloupci „interval“ je zadáván časový interval mezi nastavením napětí a odečtem proudu I_{sd} . Toto měření probíhá pro každé konstantní U_g , které je v podstatě reprezentováno každým řádkem tabulky. Ve sloupci „T“ se zadávají hodnoty regulované teploty.

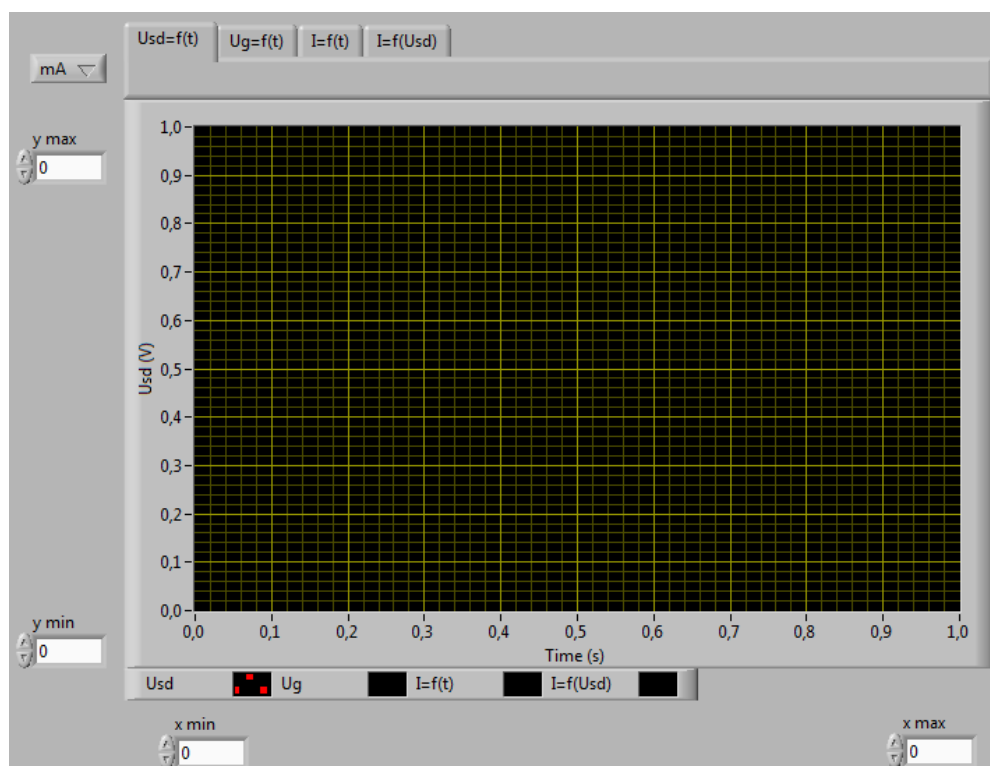
Automatické měření je prováděno po řádek, v kterém je vyplněna alespoň jedna buňka, v opačném případě, kdy není vyplněna ani jedna buňka, končí měření v řádku výše. Pro usnadnění zadávání parametrů měření, není nutné vyplňovat celou tabulku. Prázdné buňky

jsou automaticky doplněny stejnou hodnotou, která je v buňce výše. Měření tak probíhá řádek po řádku, respektive při dosažení hodnoty „Usd1“ je v zápětí nastaveno „Usd0“ z dalšího řádku a lze tedy nastavit jakoukoliv napěťovou křivku. Ovšem při měření výstupní i převodní charakteristiky byly pozorovány negativní vlivy při přeskoku z hodnoty „Usd1“ na „Usd0“ a byla implementována funkce čekání (časové kompenzace). To je prováděno zadáním hodnoty „0“ do sloupce „dUsd“. Při tomto čekání (kompenzaci) je nastavována 60x hodnota „Usd0“ při daném intervalu. Data při čekání u napětí „Usd0“ jsou taky vkládána do paměti programu a následně i do uloženého souboru. Tato data lze následně vymazat a dostat korektní výstupní i převodní charakteristiky.

Obdobně to platí i pro druhou tabulku, v které se ovšem mění U_g za konstantního U_{sd} v řádku, tedy pro měření převodní charakteristiky. Přepínání mezi měřením výstupní a převodní charakteristiky je uskutečněno virtuálním páčkovým přepínačem mezi tabulkami. Směr páčky ukazuje, která charakteristika má být odměřena a musí být přepnuta před spuštěním automatického měření.

4.1.3 Vykreslování dat

Data měření, tedy hodnoty času, napětí U_g , U_{sd} a proudu I_{sd} jsou ukládány do paměti programu a následně vynášeny do grafu (viz Obr. 22).



Obr. 22 Graf programu MeasFET

Záložky nad grafem zobrazují, jaká data jsou vynášena do grafu, respektive jaká je vykreslena charakteristika v grafu. Pod grafem je legenda zobrazovaných dat. Dále jsou kolem grafu textová pole pro nastavování zobrazované oblasti grafu (x min/max a y min/max). Jelikož jsou data I_{sd} ukládána do paměti programu v ampérech je implementováno tlačítko pro změnu zobrazování jednotek I_{sd} (mA, mA, nA a pA).

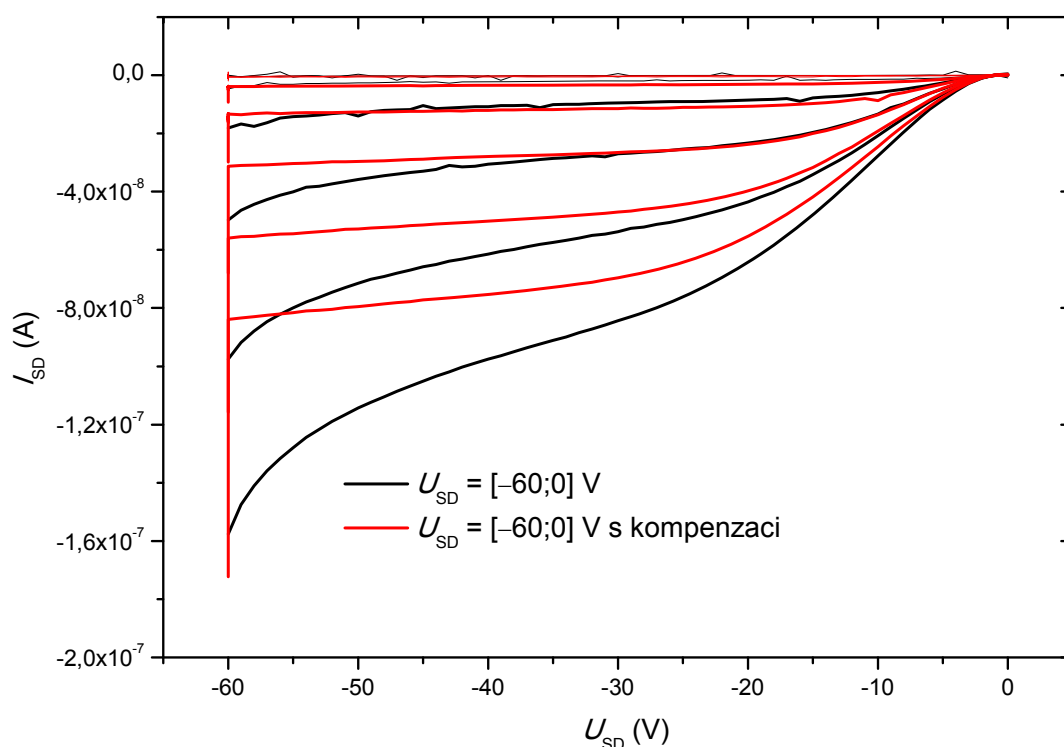
4.2 Vlivy zkreslující výstupní charakteristiky

U látek pro FET tranzistory, které mají nízkou vodivost, častěji dochází ke zkreslení FETové výstupní i převodní charakteristiky, ať už napětovým šumem šířeným vzduchem, nebo kapacitním nabíjením tranzistoru. Šumu se dá zbavit řádným odstíněním měřících kabelů, kdežto kapacitní nabíjení je způsobené vlastností vzorku a přímým měřením jeho výstupní a převodní charakteristiky FETu.

Měření všech těchto nepříznivých vlastností bylo měřeno na vzorku U04, který je brán jako výchozí látka a tedy i standard, ke kterému se porovnávají další vzorky. Vzorek U04 je příkladem organického polovodiče typu P, a tedy výstupní i převodní charakteristika je pro záporné U_{sd} a U_g . Většina měření byla prováděna na jednom z 16-ti FETů a to převážně na elektrodách se vzdáleností 2,5 mikrometrů, které jsou blíže středu TFT platformy. Předpokladem je, že obdobné charakteristiky by vznikly i pro N typ polovodiče.

4.2.1 Měření od -60 V k 0 V

Při prvotním měření výstupní charakteristiky bylo hledáno optimální nastavení parametrů měření. Při nich bylo měřeno od počátečního napětí -60 V do 0 V s intervalem 1 sekundy a kroku 1 V (viz obr 23). Měření bylo prováděno za konstantního osvětlení a pod dusíkovou atmosférou. Napětí na U_g bylo měněno po deseti voltech od 0 do -60 V (7 křivek).



Obr. 23 Výstupní charakteristiky vzorku U04 při měření od -60 V k 0 V.

Při měření bez kompenzace je u černých křivek vidět, že je měření ovlivněno kapacitním nabíjením. Při přeskočení z $U_{sd1} = 0$ V na $U_{sd0} = -60$ V zůstává v látce náboj a dochází ke zvýšení proudu. Příspěvek nabíjecího proudu exponenciálně klesá s časem a celková hodnota procházejícího proudu se ustálí na velikosti dané vodivostí FET struktury, proto křivka

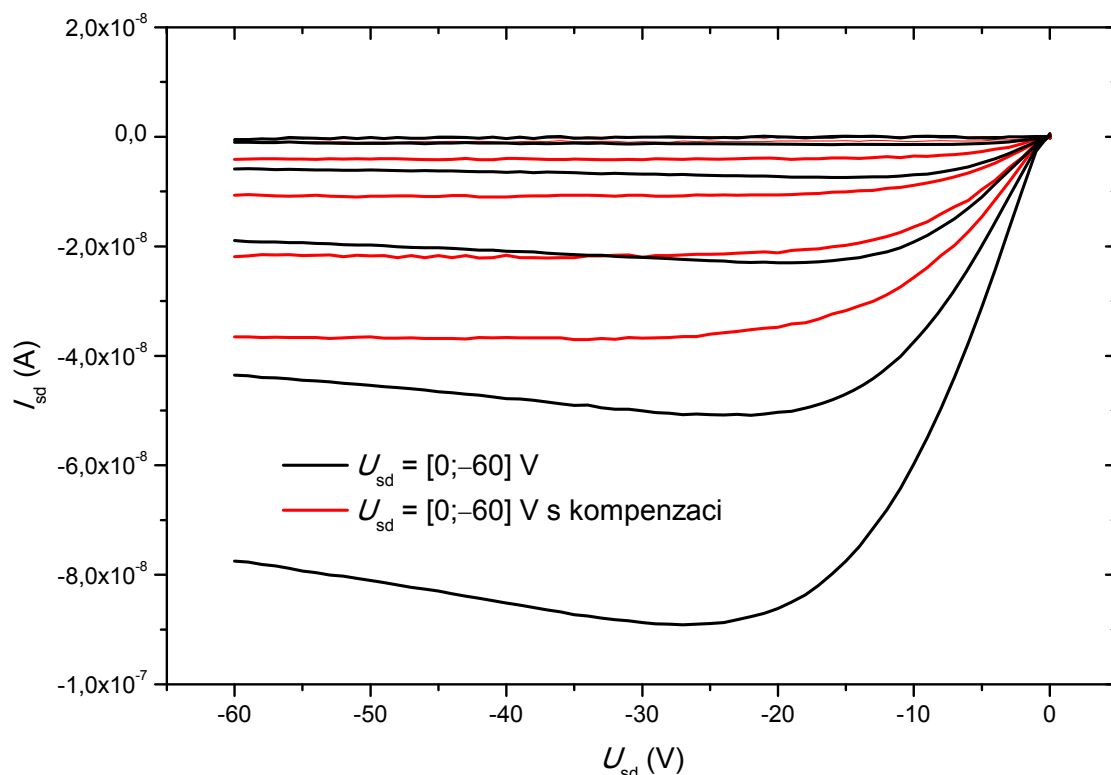
s kompenzací není chybou zatížena. V oblasti vyššího U_{sd} by mělo docházet k saturaci I_{sd} v závislosti na U_{sd} , tedy křivky by měly být rovnoběžné s osou x.

Pozorovaný jev může být také způsoben generací volných nosičů náboje strmým náběhem elektrického pole a jeho následný pokles v čase způsobený rekombinací části vygenerovaných nosičů náboje ve struktuře látky.

Při měření s kompenzací (červená křivka) by byl při zobrazení v závislosti na čase vidět klesající proud při -60 V (v tomto grafu svislá čára). Časová kompenzace byla nastavena pro cca 1 minutu. Tato převodní charakteristika vykazuje větší stabilitu způsobenou odvedením vzniklého náboje elektrodami. V ohmické oblasti, kde se hodnoty proudu blíží nule, dochází k předčasnému snížení proudu na nulu, zhruba okolo -3 V. Je to pravděpodobně způsobeno coulombickými silami (strhávání volných nosičů náboje), jež předčasně odvedou volné nosiče náboje k elektrodám. Toto tvrzení by mělo být prokázáno při měření od 0 V směrem k -60 V, kde by při 0 V mělo být ve vzorku dostatečné množství volných nosičů náboje, a tedy křivky začnou stoupat již od 0 V.

4.2.2 Měření od 0 V k -60 V

Dalším měřením na stejném FETu, za konstantního osvětlení a pod dusíkovou atmosférou, byly naměřeny výstupní charakteristiky, jež jsou vidět na Obr. 24. Při tomto měření bylo měřeno od $U_{sd} = 0$ V k $U_{sd} = -60$ V s intervalem 1 sekundy. Napětí na U_g bylo zvyšováno po 10 voltech od 0 k -60 voltům. Opět bylo provedeno měření bez a s kompenzací při přeskoce cca 1 minuty.



Obr. 24 Výstupní charakteristiky U04 při měření od 0 V k -60 V

Při měření bez kompenzace (černé křivky) je vidět nestabilita výstupní charakteristiky. Tato nestabilita je způsobená vyšší koncentrací nosičů náboje, ať už generací elektrickým

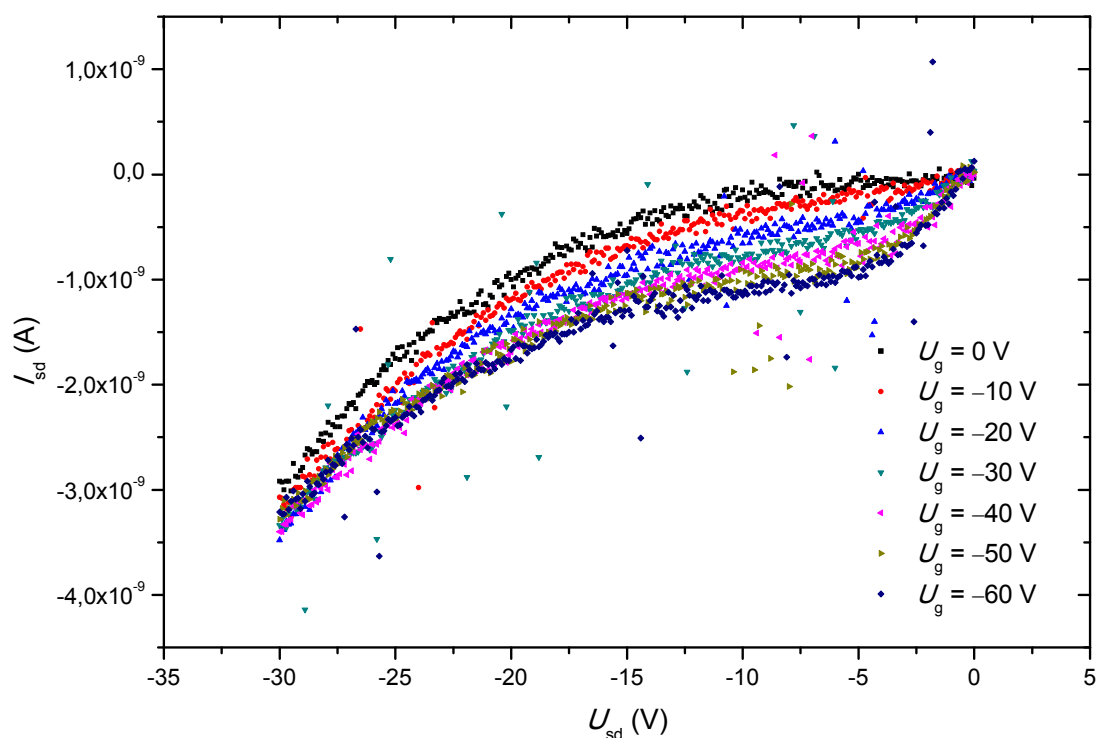
polem nebo kapacitním nabíjením tranzistoru. Při přeskoku z -60 V na 0 V je v polovodivé vrstvě nadměrné množství volných nosičů náboje. Při opětovném měření od 0 V tedy přispívají ke zvýšení procházejícího proudu. Když jsou tyto nadbytečné nosiče náboje odvedeny, dochází ke snížení procházejícího proudu, jelikož je koncentrace volných nosičů náboje generovaných elektrickým polem (případně světelným zářením) nižší.

Potom tedy při stejném měření, ale s kompenzací (červené křivky) při 0 V , dojde k odvedení, nebo rekombinaci volných nosičů náboje. Volné nosiče náboje tedy vznikají převážně přiloženým elektrickým polem a při zvyšování napětí dochází k saturaci, i když maximální proud I_{sd} je nižší.

Tvrzení z předchozí kapitoly (4.2.1), kde docházelo ke strhávání volných nosičů náboje, bylo prokázáno. Tedy při zvyšování napětí od 0 V proud lineárně vzrůstá. To značí, že k pohybu nosičů náboje stačí nízkého napětí, avšak tyto nosiče náboje musí být přítomny v polovodiči.

4.2.3 Vliv rychlosti měření

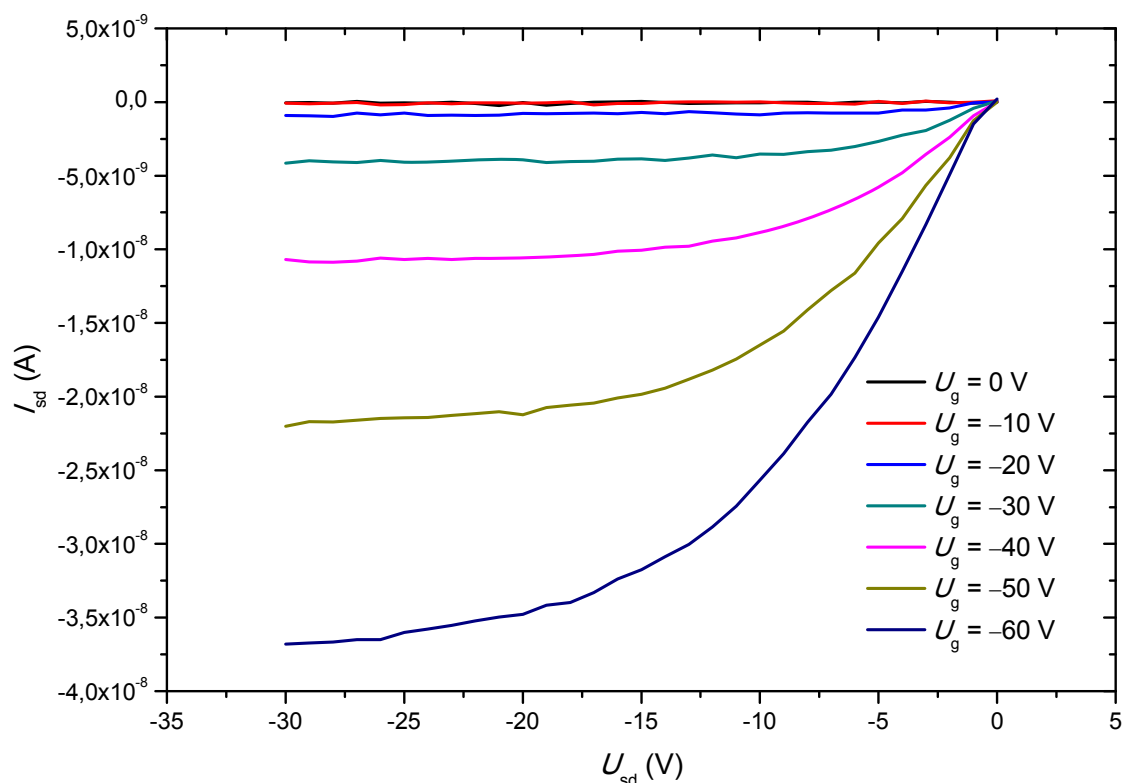
Kvůli stabilitě výstupní charakteristiky bylo potřeba odměřit vliv rychlosti měření, respektive jakým napěťovým schodkem má být měřena výstupní charakteristika. Byla tedy na stejném FETu odměřena výstupní charakteristika od $U_{sd} = 0\text{ V}$ k $U_{sd} = -30\text{ V}$ s napěťovým schodkem $0,1$ a 1 V (Obr. 25 a Obr. 26). Napětí na G elektrodě bylo zvyšováno po 10 voltech od 0 do -60 V . Časový interval byl ponechán při jedné sekundě a obě charakteristiky byly měřeny s časovou kompenzací. Opět bylo měřeno pod dusíkem a za konstantního laboratorního osvětlení.



Obr. 25 Výstupní charakteristika U04 s napěťovým schodkem $0,1\text{ V}$ a s kompenzací

Tato výstupní charakteristika (Obr. 25) vykazuje omnoho nižší proudy I_{sd} . Je to s největší pravděpodobností způsobeno nižší generací volných nosičů náboje při nižším napěťovém

schodku, respektive při vyšším napětovém schodku je větší množství nosičů náboje vybuzeno z potenciálové jámy. Navíc dochází ke zkreslení křivek vlivem diodové charakteristiky polovodivého materiálu (viz. křivka pro $U_g = 0$ V), která převládá nad výstupní charakteristikou FET struktury. Dlouhodobějším měřením se zvětšuje šance, že charakteristiky budou ovlivněny událostmi, jako jsou například průjezd tramvaje, nebo otřesy nakontaktovaného vzorku (body mimo charakteristiku na Obr. 25).



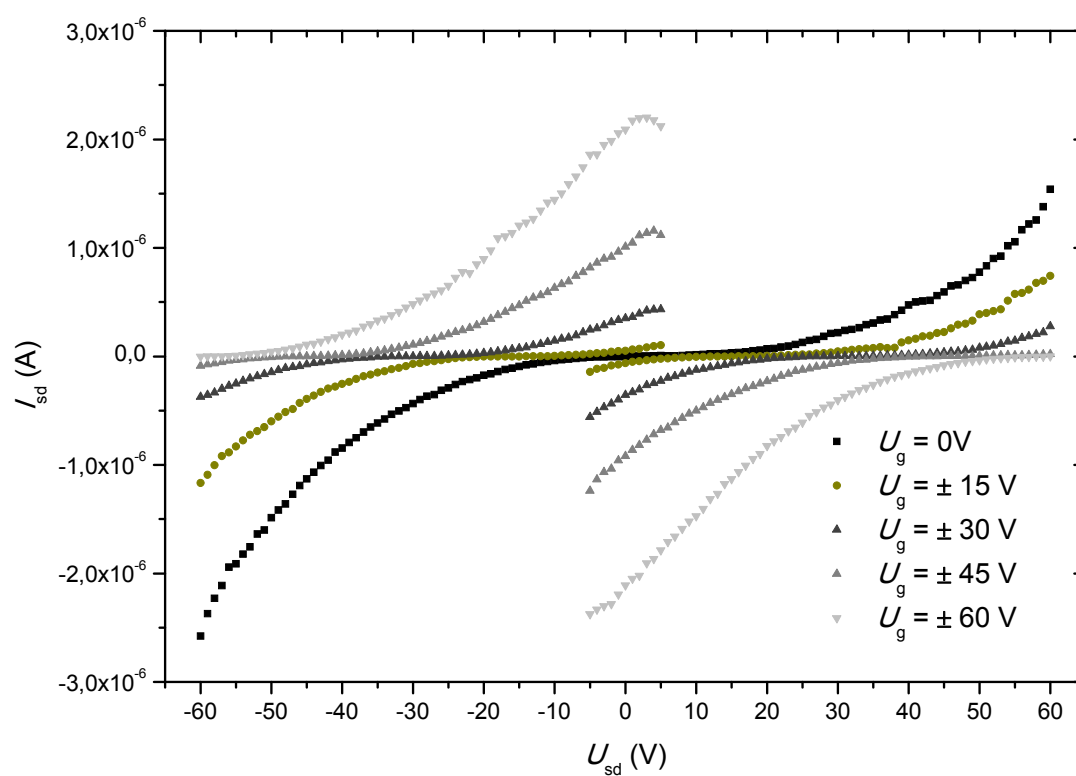
Obr. 26 Výstupní charakteristika U04 s napětovým schodkem 1 V a s kompenzací

Při porovnání obou charakteristik (Obr. 25 a Obr. 26), lze pozorovat shodu v ohmické oblasti, kde lineární část nárůstu proudu je do $U_{sd} = -5$ V. I když charakteristika s vyšším napětovým schodkem vykazuje i vyšší procházející proudy, je zřejmé, že charakteristika na Obr. 25 bude více odpovídat reálnému tranzistoru.

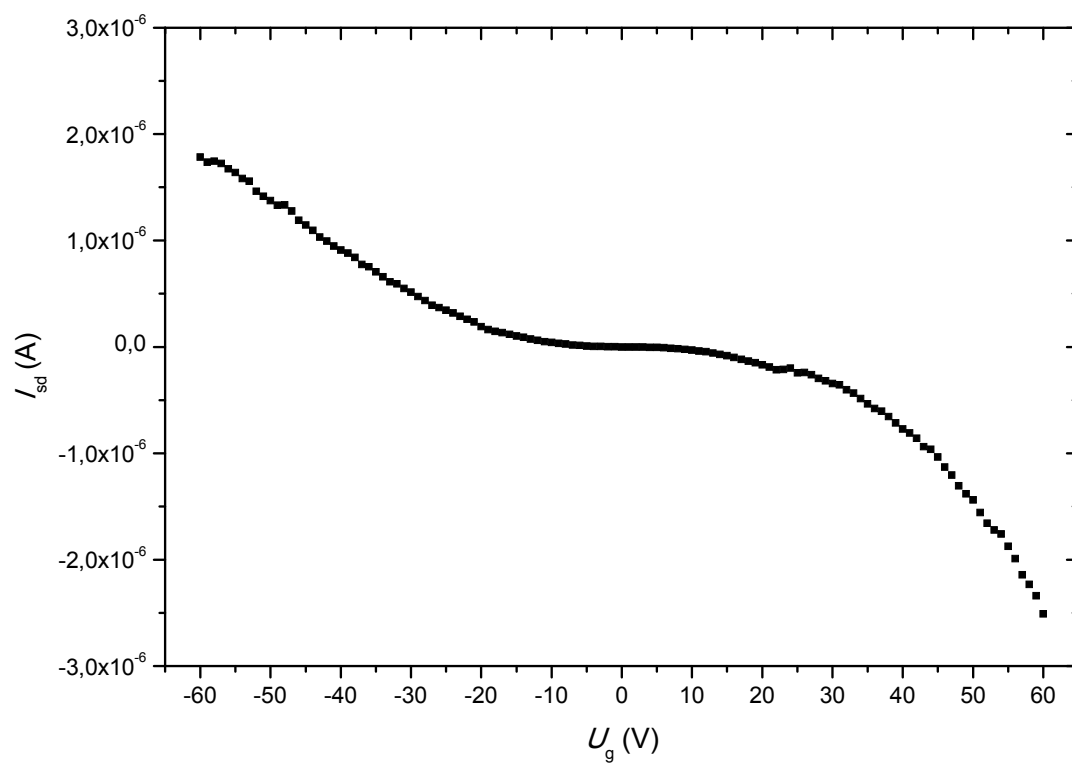
To ovšem nebrání určení napětí U_{sd} , při kterém se má měřit převodní charakteristika. V tomto případě se jedná o napětí do -5 V pro ohmickou oblast.

4.2.4 Charakteristika zkratovaného FETu

Během měření dalších vzorků, které nejsou součástí diplomové práce, byla na vzorku U64 odměřena výstupní i převodní charakteristika zkratovaného FETu (Obr. 27). Došlo k porušení vrstvy oxidu křemíku a tedy ke vzniku vodivého kanálu mezi G elektrodou a jednou z vrchních zlatých elektrod. Díky tomu došlo k enormnímu nárůstu proudu I_{sd} i při $U_{sd} = 0$ V a to v závislosti na U_g . To dokazuje křivka při $U_g = 0$ V, která má diodovou charakteristiku. Při zvyšování (snížování) napětí na G elektrodě, dochází ke sčítání napětí s U_{sd} a tedy i posunu křivky. Potvrzení proraženého FETu bylo provedeno odměřením převodní charakteristiky při napětí $U_{sd} = 0$ V (Obr. 28).



Obr. 27 Výstupní charakteristika zkratovaného FETu vzorku U64



Obr. 28 Převodní charakteristika zkratovaného FETu U64 při $U_{sd} = 0V$.

Tento zkratovaný FET by mohl negativně ovlivňovat další FETy v okolí tohoto proraženého FETu. Ovlivňování bude tím zřetelnější, čím bude pohyblivost nosičů v polovodivé vrstvě větší, respektive, čím větší proud bude procházet nanosenou polovodivou vrstvou. Je to způsobené provedením FETové platformy, kde jednotlivé vrstvy jsou přes celý substrát. Tento zkratovaný FET byl vyfocen optickým mikroskopem (Obr. 29) kvůli ujištění, že oxidová vrstva nebyla porušena při kontaktování jehlových elektrod.



Obr. 29 Foto zkratovaného FETu.

Na Obr. 29 je viditelné, že k porušení elektrod a zřejmě i oxidové vrstvy došlo ještě před nanesením organické vrstvy, neboť v místě poruchy není vidět defekt vrstvy. K porušení tak mohlo dojít již při výrobě platformy nebo pravděpodobněji při manipulaci s ní.

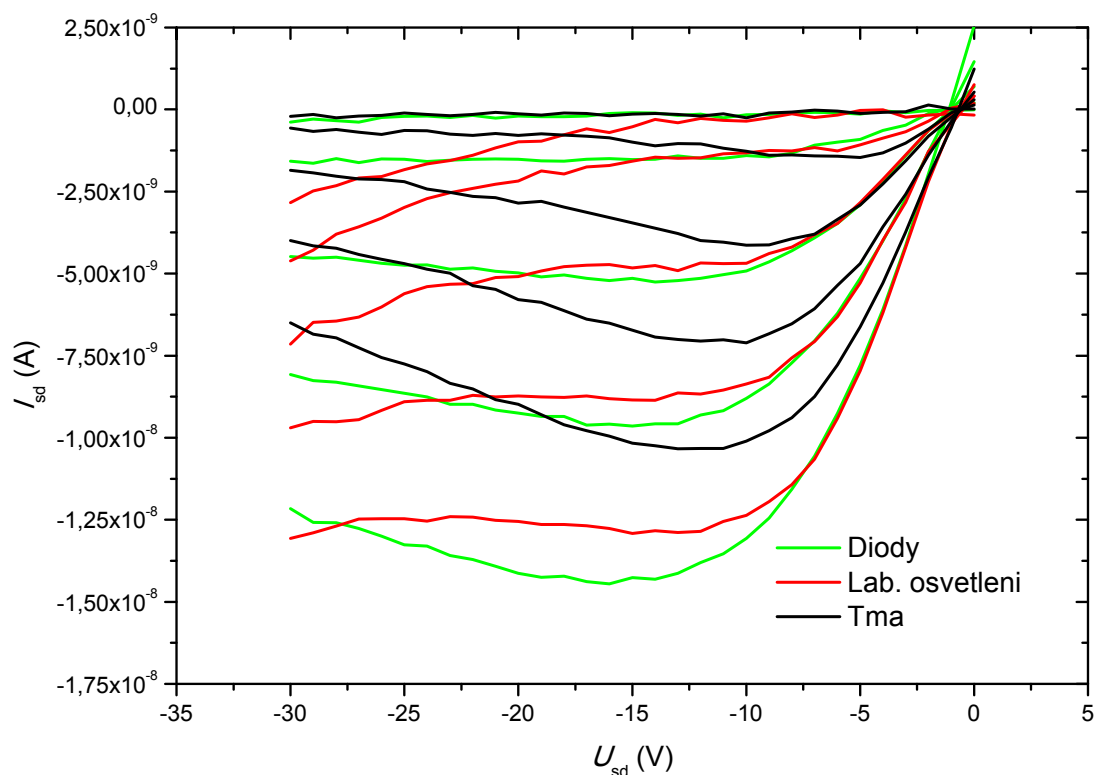
4.3 Vliv prostředí na měření

Během testovacích opakovaných měření prováděných zejména z důvodu zlepšení reprodukovatelnosti měření charakteristik docházelo zprvu k získání poměrně odlišných výsledků. Proto byly zkoumány vnější vlivy, jako je osvětlení, či případná absorbovaná vlhkost na vzorku, které by mohly negativně ovlivnit reprodukovatelnost měření.

4.3.1 Světlo vs. tma

Při prvních měřeních nebylo známo, jestli jsou používané nové deriváty fotovodivé či nikoliv. Generace volných nosičů náboje světelným zářením by znamenala zvýšení protékajícího proudu I_{sd} . Bylo tedy provedeno měření za různého osvětlení. Bylo použito osvětlení diodami, které jsou součástí USB mikroskopu a laboratorního osvětlení. K tomu byla odměřena i charakteristika za naprosté tmy.

Výstupní charakteristiky byly měřeny se schodkem 1 V, intervalu 1 sekundy, od 0 V a pod dusíkovou atmosférou. Na Obr. 30 jsou porovnávány tři výstupní charakteristiky.



Obr. 30 Charakteristika U04 za různého osvětlení

Jelikož všechny charakteristiky byly měřeny za stejných podmínek, jen pod různým osvětlením, lze říct, že látka U04 je fotovodivá. Rozdílné charakteristiky pro osvětlení diodou a laboratorním osvětlením jsou způsobené rozdílnými intenzitami a odlišným spektrem.

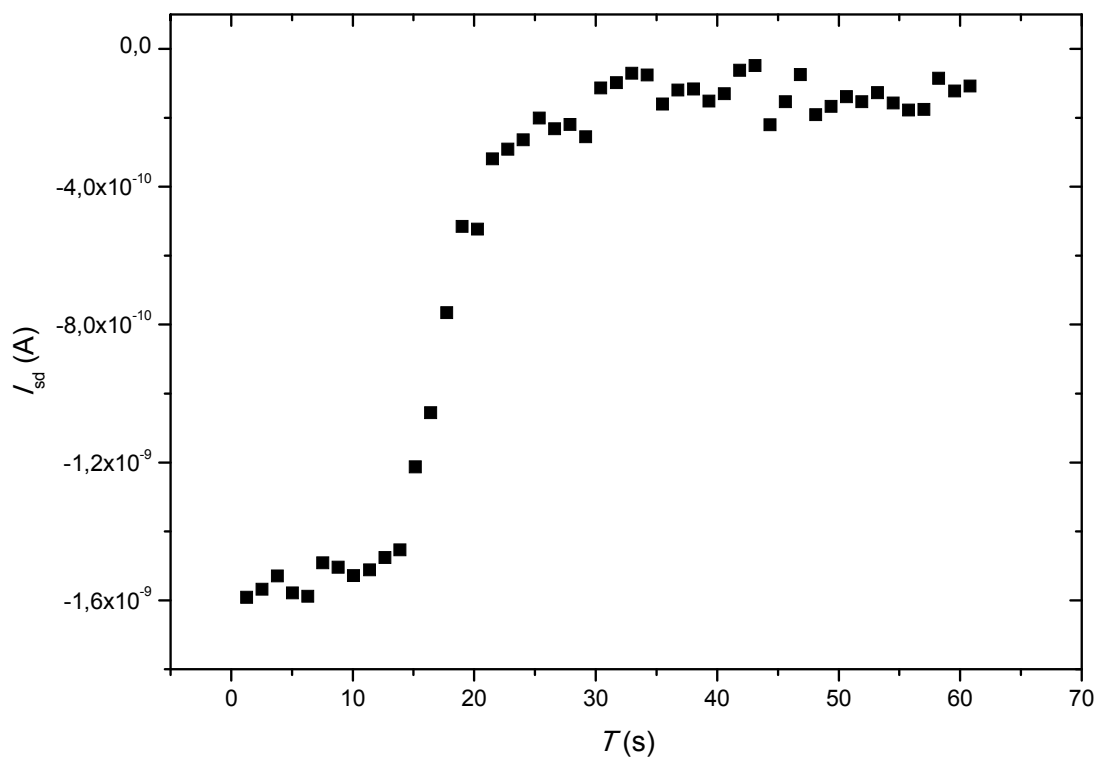
V grafu jde dále vidět, že pokud není použito kompenzace, dochází k vybíjení zbytkového proudu při $U_{sd} = 0$ V a následně i posunu „nuly“ na hodnotu -3 V. Pokud není použito časové kompenzace, dalo by se použít napěťové kompenzace. Ta by spočívala už při nastavení parametrů měření, kdy by se počáteční napětí U_{SD0} posunulo (počátek křivek) do kladnějších hodnot, například 3 nebo 5 voltů. Při přeskočení z -60 V na 5 V by došlo k odvedení náboje (v oblasti od 5 do 0 V) a proud při $U_{sd} = 0$ V by byl „nulový“.

4.3.2 Vzduch vs. dusík

Vliv měření na vzduchu, respektive absorbované vlhkosti na povrchu vzorku, byl nejdříve měřen na čistém umytém substrátu. Při tomto měření nelze použít klasického měření výstupní nebo převodní charakteristiky z důvodu nepřítomnosti organického polovodiče.

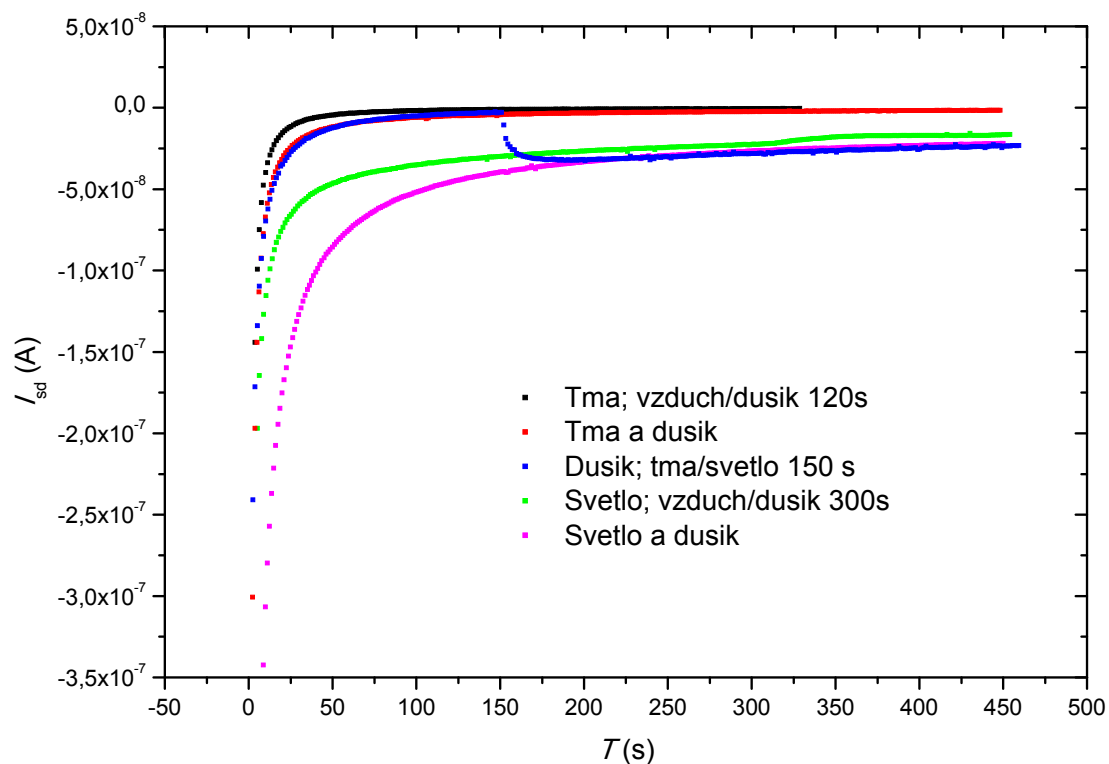
Při měření bylo použito možnosti vyplnit tabulky (pro měření) tak, aby zůstaly konstantní hodnoty napětí U_{sd} i U_g (-60 V) a hodnoty procházejícího proudu I_{sd} byly vynášeny v čase (viz Obr. 31). Na začátku byl vložen vzorek do komory, tedy měření za vzduchu a po spuštění měření byl teprve v čase 15 sekund vypuštěn dusík do komory.

Z grafu je patrné, že proud 1,5 nA při počátku měření, je způsoben vzdušnou vlhkostí, respektive vrstvičkou vody, která je na povrchu substrátu (elektrod). To dokazuje pokles proudu po vpuštění dusíku v 15 sekundách.



Obr. 31 Vliv vzdušné vlhkosti na substrátu a dusíku od 15 sekund na I_{sd} .

Vliv vzdušné vlhkosti i osvětlení byl následně ověřen i na vzorku U04, kde probíhalo měření obdobně jako u čistého substrátu. Bylo opět měřeno při $U_{sd} = -60$ V a $U_g = -60$ V, kdy byl pozorován protékající proud I_{sd} v čase (viz Obr. 32).



Obr. 32 Vliv vlhkosti a osvětlení na proud vzorkem U04 v čase.

Měření bylo prováděno za různého osvětlení a pod různou atmosférou. Vysvětlivky ukazují, za jakých podmínek bylo měřeno. Tedy pokud je napsáno „Tma; vzduch/dusík 120s“ znamená to, že měření probíhalo za tmy a pod vzdušnou atmosférou a v čase 120 sekund byl vpuštěn dusík do komory se vzorkem.

Vliv světla hraje u vzorku U04 celkem podstatnou roli. Pokud je měřeno za tmy, dochází k poklesu proudu až téměř k nule. Proud I_{sd} při měření za tmy jsou tak malé, že v porovnání s hodnotami proudu za světla nejde určit, jestli vlhkost ovlivňuje měření (černá křivka). To lze posoudit až při měření za světla (zelená křivka), kdy byl v čase 300 sekund vpuštěn dusík. Došlo k odstranění vzdušné vlhkosti a tedy i k výraznějšímu poklesu proudu.

Pro kontrolu, zdali jde opravdu o generování volných nosičů náboje světelným zářením a ne další vnější podmínkou, bylo provedeno měření (modrá křivka) pod dusíkem a za tmy. Následně v průběhu měření v čase 150 sekund byly rozsvíceny diody. Došlo k nárůstu proudu zhruba o 50 nanoampér a výsledný proud dorovnal na křivku (růžová), kde bylo od počátku měřeno za světla a pod dusíkem. Z toho lze usuzovat, že pokud bude měřena převodní charakteristika za světla a pod dusíkem, bude směrnice přímků větší, než za tmy a na vzduchu.

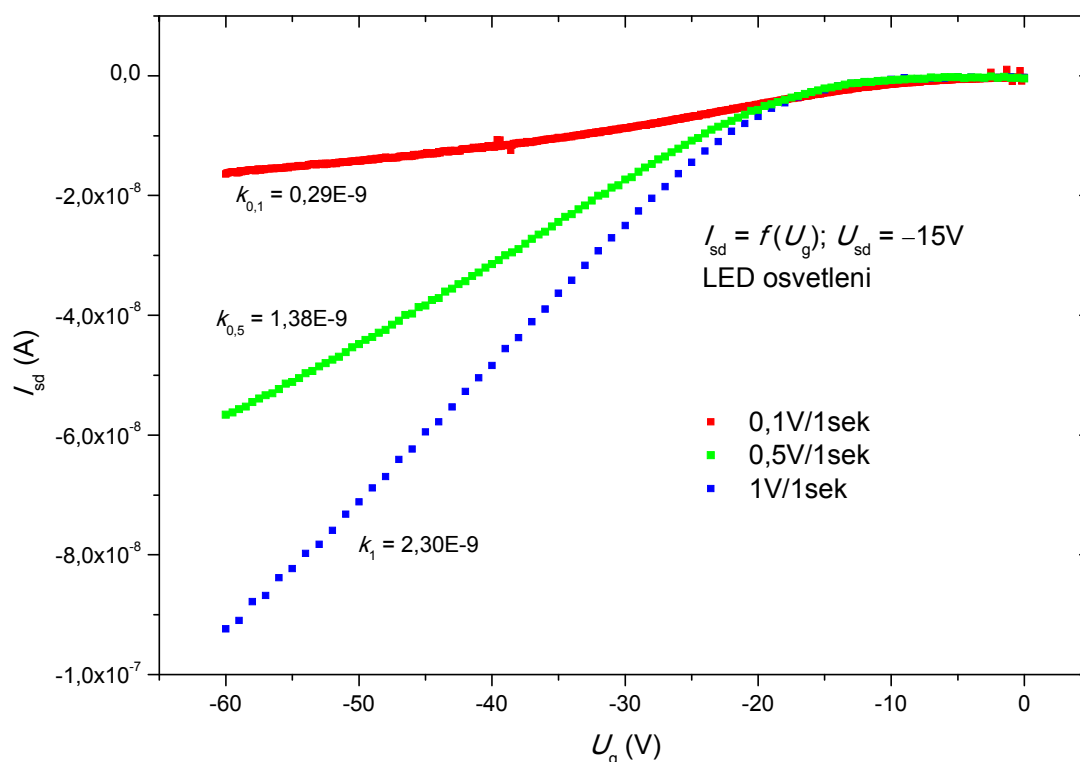
4.4 Vlivy na měření převodní charakteristiky

Publikace uvádějí,²¹⁻²³ že u FETů z anorganických materiálů, lze převodní charakteristiku odvodit z výstupní. Bohužel organické materiály mají mnohem nižší pohyblivost nosičů náboje a tedy i měření převodní charakteristiky může být různě ovlivněno. Z předešlé kapitoly lze usoudit, že za světla bude strmost křivky převodní charakteristiky větší a tedy i výsledná pohyblivost bude větší. Jelikož kontaktování jednotlivých FETů jehlovými elektrodami probíhá za světla, mohou být charakteristiky měřené za tmy ovlivněny nosiči náboje, které byly generovány světlem. Ovšem nejen světlo a vlhkost mohou ovlivňovat měření, ale především i rychlost samotného měření.

4.4.1 Vliv dV za konstantního dT

Jelikož bylo prokázáno, že velikost napětového schodku má vliv na měření výstupní charakteristiky, bylo zkoumáno, jaký vliv má napětový schodek i na převodní charakteristiku. Jelikož při měření převodní charakteristiky je napětí U_{sd} konstantní, lze vliv změny napětového schodku výstupní charakteristiky zanedbat, respektive měla by platit výstupní charakteristika pro napětový schodek blížící se nule.

Byly odměřeny převodní charakteristiky (Obr. 33) při různém napětovém schodku U_g od počátku křivek 0 V, pod dusíkem, LED osvětlením a při $U_{sd} = -15$ V na stejném FETu. Interval mezi nastavením napětí a odečtem proudu je 1 sekunda a je u všech měření stejná. K jednotlivým křivkám byly přidány i směrnice přímků lineárního nárůstu proudu, které se používají pro výpočet pohyblivosti nosičů náboje.

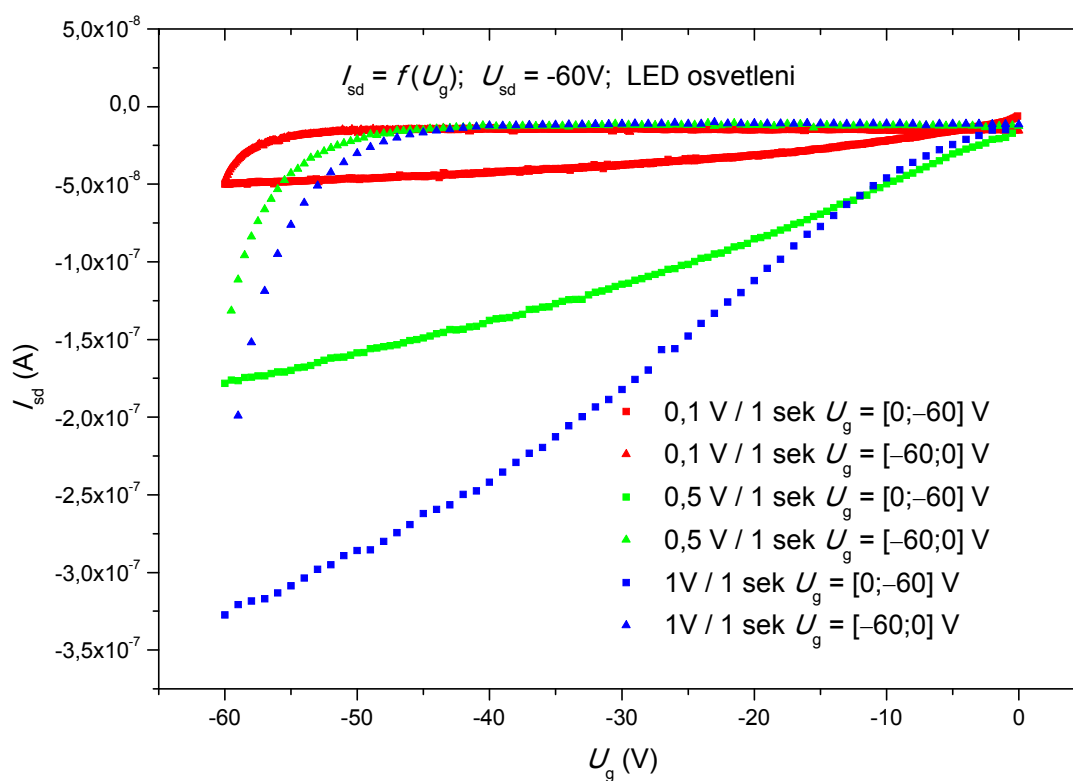


Obr. 33 Vliv napěťového schodku U_g a konstantního intervalu.

Z grafu je zřejmé, že i při měření převodní charakteristiky hraje napěťový schodek podstatnou roli. Rozdíl směrnic pro nejnižší a nejvyšší napěťový schodek je desetinásobný. Tedy potom i výpočet pohyblivosti se bude lišit o jeden řád. Pokud vynásobíme nejnižší směrnicí hodnotou 5 a 10 (kolikrát je menší napěťový schodek), dostaneme přibližně hodnoty další dvou směrnic. Nicméně vztah, který slouží k výpočtu pohyblivosti, přepočítává napěťový schodek na jednotkové napětí U_g a kvůli odlišnému nárůstu proudu I_{sd} se bude vypočítaná pohyblivost lišit.

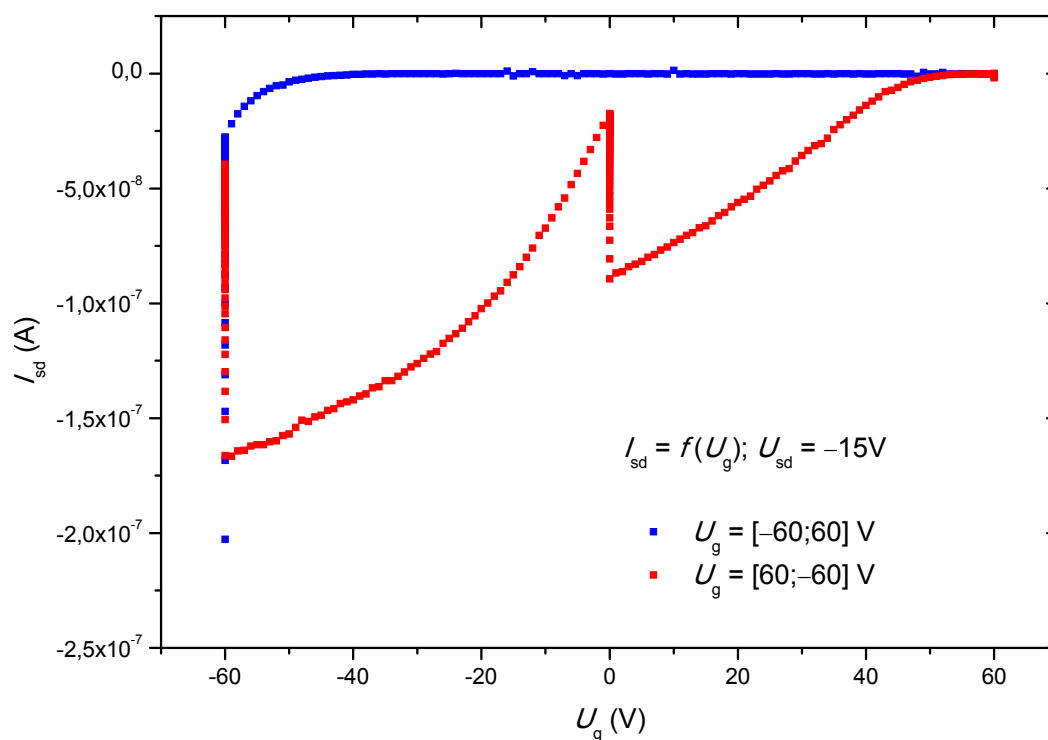
Dalším obdobným měřením (Obr. 34) byla zjišťována závislost směru měření převodní charakteristiky. Tedy jestli a jak moc závisí na směru měření z hlediska změny U_g . Měření bylo provedeno pro U_g od počátku 0 V k -60 V a zpět od -60 V k nule při napěťovém kroku 1 V . Opět bylo měřeno pod dusíkem a za LED osvětlení, ale při $U_{sd} = -60 \text{ V}$, tedy v saturační oblasti výstupní charakteristiky (vyšší proudy). Popisek v legendě je označen např. $[0; -60] \text{ V}$ a znamená, že křivka začíná od 0 V a končí -60 V .

Z grafu na Obr. 34 je vidět, že při zvyšujícím se napětí na U_g , se rozšiřuje vodivý kanál mezi S a D elektrodou. Pokud ovšem začne klesat napětí, dochází k poměrně rychlému uzavření vodivého kanálu a klesnutí proudu I_{sd} k nule. Tento jev lze pozorovat pro jakýkoliv napěťový schodek U_g a je tedy nezávislou vlastností materiálu U04.



Obr. 34 Vliv napěťového schodku a směru měření na převodní charakteristiku.

O tom, jak moc je měření převodní charakteristiky zatíženo dynamikou se můžeme přesvědčit na Obr. 35. Zde probíhalo měření při LED osvětlení, pod dusíkem s napěťovým krokem 1 V a napětím na $U_{sd} = -15$ V.

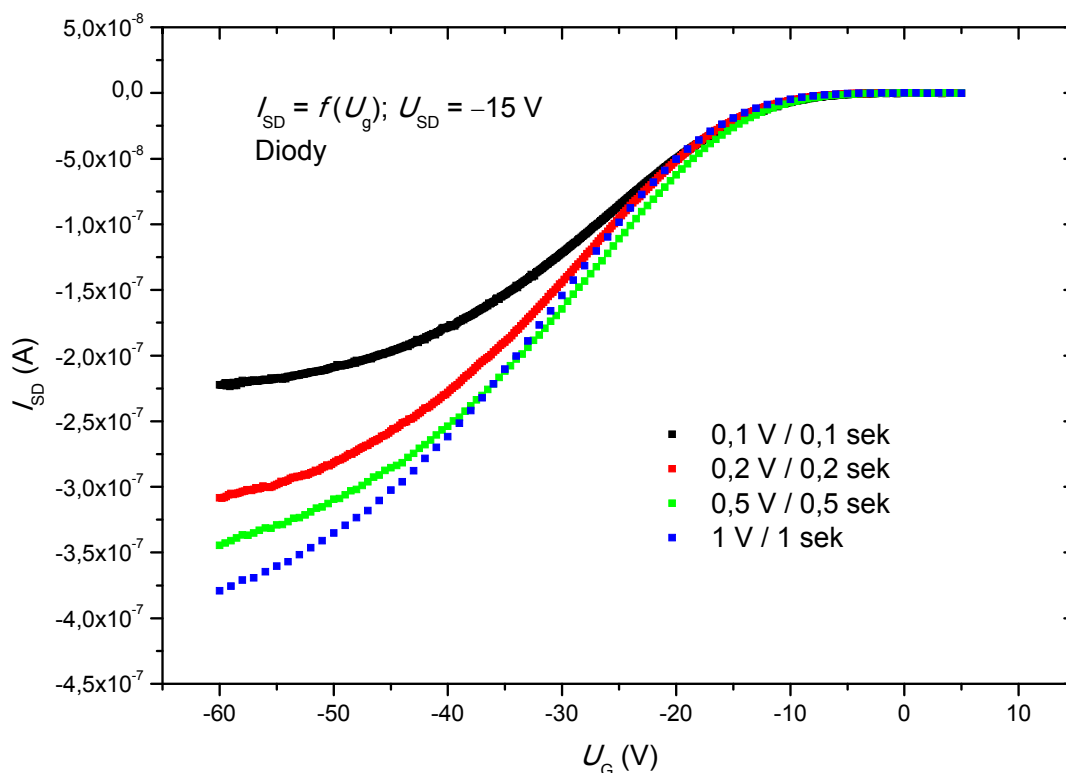


Obr. 35 Vliv dynamických vlastností na měření převodní charakteristiky U04.

Počátek měření začal při $U_g = -60$ V, kde bylo použito minutové kompenzace (modrá křivka). Zde docházelo k prudkému poklesu proudu přibližně k hodnotě -25 nA, což je přibližně stejná hodnota proudu, jako při měření na Obr. 33 s nejnižším schodkem. Po cca minutě bylo nastavováno napětí U_g od -60 V k 60 V a při 60 V bylo opět použito minutové kompenzace. Během snižování napětí došlo opět k poklesu proudu k nule a tato hodnota se držela až po $U_{sd} = 60$ V, tedy došlo k uzavření vodivého kanálu. Následně bylo nastavováno napětí od 60 V do 0 V, kde v bodě nula bylo opět použito minutové kompenzace. Tato křivka je podobná křivce na Obr. 33, s tím, že její počátek je posunut na 60 V. Naznačuje to, že měření převodní charakteristiky jsou ovlivněny dynamickými parametry měření.

4.4.2 Vliv konstantního dV a dT

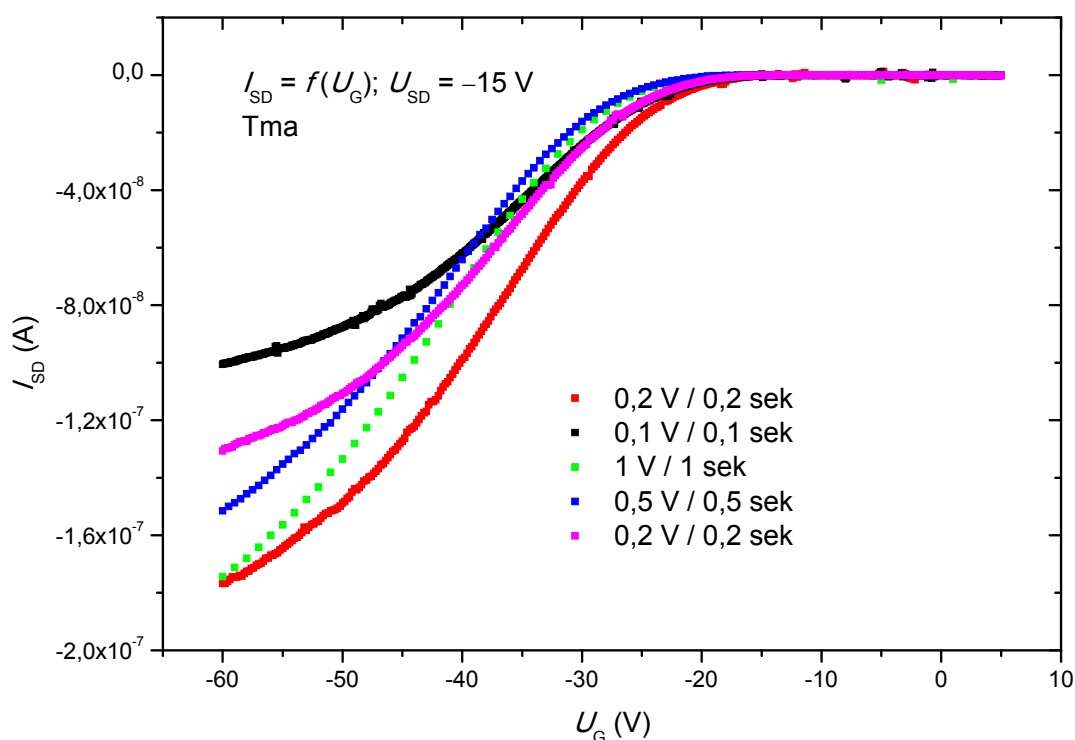
Doposud byl zkoumáný převážně vliv napětového schodku na měření výstupní i převodní charakteristiky. Vyvstává otázka, zdali a jak moc se budou měnit převodní charakteristiky za použití různého napětového schodku a různého časového intervalu, s tím, že výsledná rychlost měření bude stejná. Například napětový schodek $0,4$ V s intervalem $0,4$ sekundy pro jednu křivku a 1 V s intervalem 1 sekundy pro druhou. Proto byly odměřeny převodní charakteristiky s celkovou rychlostí 1 V za 1 sekundu, pro osvětlení diodami (Obr. 36) a za tmy (Obr. 37).



Obr. 36 Převodní charakteristiky s konstantní rychlostí za LED osvětlení.

Maximální proud je ovlivněn napětovým schodkem (přímá úměra), ovšem směrnice přímků lineárního nárůstu proudu, z kterého se vypočítává pohyblivost nosičů náboje, je víceméně stejná pro všechny měření s výjimkou nejmenšího schodku s nejmenším časovým intervalem. Odlišný průběh křivky (s nejmenším intervalem) je s největší pravděpodobností způsoben silným hardwarovým vytížením Keithley 617, který slouží právě pro nastavování

napětí na G elektrodě. Toto tvrzení je založeno i na pozorování při měření, kdy přístroj hlásil na světelném panelu „error“. Vyplývá z toho doporučení ověřit v těchto podmínkách průběh napětí v čase nezávislým měřicím přístrojem. Pokud toto měření bude porovnáno s měřením za tmy na Obr. 37, vyjde, že sice rozptýl proudů jednotlivých měření není tak razantní, ale mění se směrnice přímků lineárního nárůstu. Odlišný průběh jednotlivých křivek je způsoben snižující se koncentrací volných nosičů náboje za tmy, které se vytvořily generací světlem při kontaktování jehlových elektrod. To potvrzují i charakteristiky (červená, růžová), kdy časový rozdíl u stejného měření mezi prvním (červená) a posledním měřením (růžová) je 15 minut.



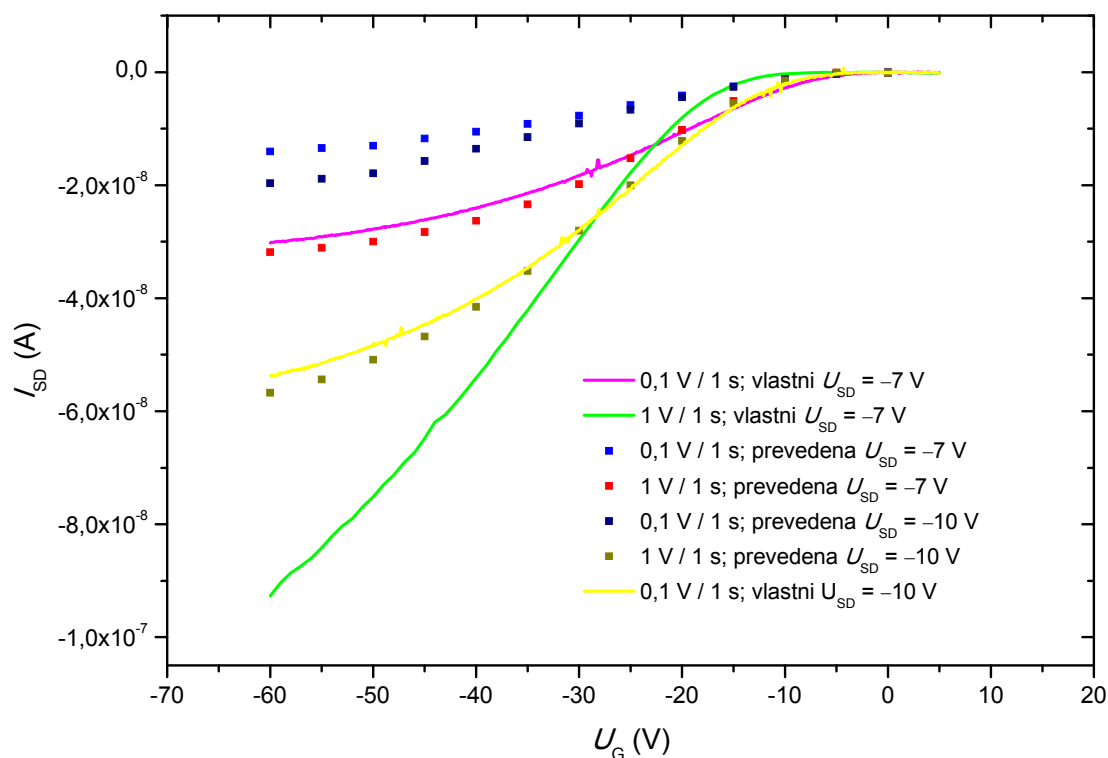
Obr. 37 Převodní charakteristiky s konstantní rychlostí za tmy

Problém nastává, když jsou v polovodičovém materiálu přítomny excitony po zhasnutí světla. Bez přiloženého napětí nedochází k difuzi excitonů na volné nosiče náboje a nemohou tak být odvedeny elektrodami. Při následném měření převodní charakteristiky může docházet ke vzniku nosičů náboje z excitonů a přispívat tak ke zvýšení proudu. Dochází tak k postupnému snižování koncentrace excitonů generovaných právě světelným zářením. Tomu by nasvědčovala i charakteristiky na Obr. 32, kde proudy při měření za tmy klesají v čase až k $I_{sd} = 0$ A a tedy dochází k disociaci excitonů (vlivem elektrického pole) na volné nosiče náboje, které jsou následně odvedeny elektrodami.

Z toho lze soudit, že reprodukovatelnější měření bude probíhat za konstantního osvětlení vzorku, než při měření za tmy a nezáleží na tom, jakou konstantní rychlostí bude převodní charakteristika odměřena. Z předešlých výsledků víme, že odměřené charakteristiky závisí na velikosti napěťového schodku (při konstantním intervalu). Nevíme ovšem, jaký je vztah mezi výstupní a převodní charakteristikou, respektive jak bude vypadat křivka, pokud vyneseme body z výstupní charakteristiky do převodní.

4.4.3 Vztah mezi výstupní a převodní charakteristikou

Vztah (Obr. 38) mezi výstupní a převodní charakteristikou byl proveden tak, že byly odměřeny dvě výstupní charakteristiky. Jedna s konstantním intervalem 1 sekundy, pod osvětlením (diody) a za dusíku, ale s napětovým krokem 0,1 a 1 V a s měřením po 5 voltech na U_g od 0 do -60 V. Ani u jednoho měření nebylo použito časové kompenzace, jen počátek křivek byl nastaven od +5 V.



Obr. 38 Vztah výstupní a převodní charakteristiky.

Křivky, respektive body v grafu jsou převedené hodnoty z měření výstupní charakteristiky (označeny „převedena“). Dvě křivky s nejnižším proudem jsou převedenými charakteristikami (pro $U_{sd} = -7$ a -10 V), kde výstupní charakteristika byla měřena rychlostí 0,1 V/s.

Křivka s nejvyššími proudy (zelená) je vlastní odměřená převodní charakteristika (označena „vlastní“) s rychlostí 1 V za sekundu. Křivky žlutá a růžová jsou také odměřené převodní charakteristiky při rychlosti 0,1 V/s. Odlišný průběh těchto dvou křivek je vlivem rozdílného U_{sd} (-7 a -10 V). K těmto křivkám byly odměřeny výstupní charakteristiky rychlostí 1 V za sekundu. Následně z těchto charakteristik byly převedeny hodnoty pro konstantní $U_{sd} = -7$ a -10 V do převodní charakteristiky (červené a hnědé body).

Z porovnání posledních měření vyplývá, že odměřené vlastní převodní charakteristiky rychlostí 0,1 V za sekundu se shodují s převedenými výstupními charakteristikami. To koresponduje s tím, že při měření výstupních charakteristiky je sice rychlost měření U_{sd} 1 V/s, ale U_g je v průběhu měření (jedné křivky) konstantní (blíží se nule).

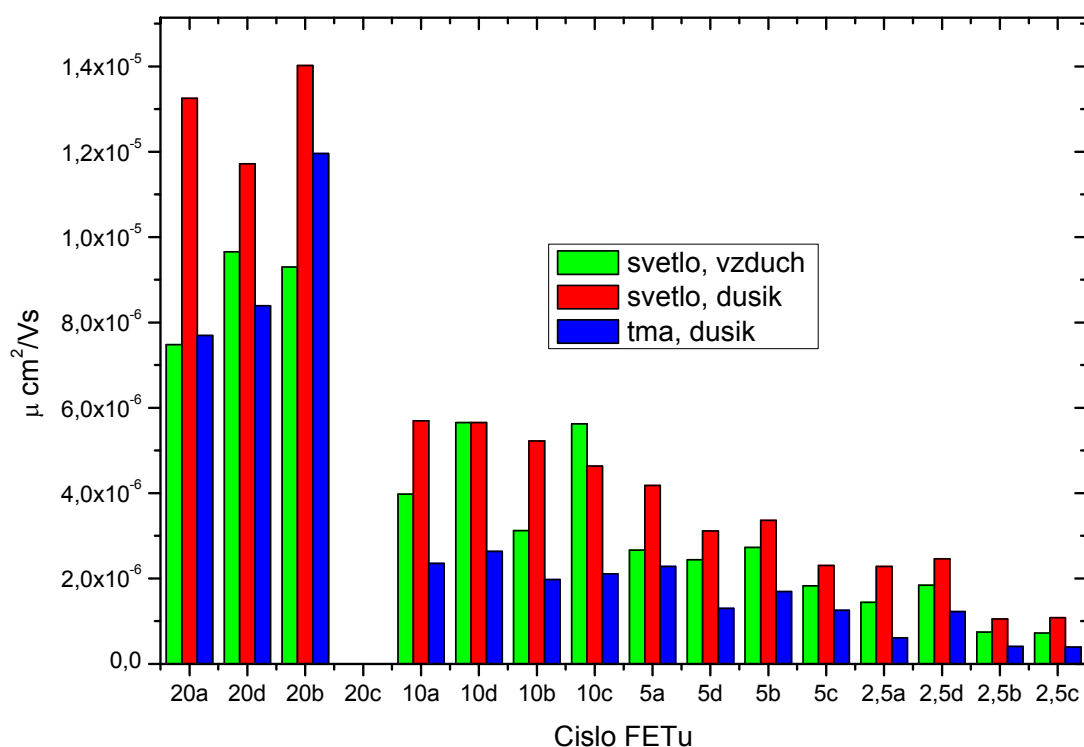
4.5 Odměřené a vypočtené hodnoty pohyblivosti

Konečným cílem bylo určit charakteristickou hodnotu pohyblivosti nosičů náboje pro jednotlivé použité materiály. Proces měření byl v několika předchozích kapitolách pozorován a byly zkoumány i vnější vlivy na měření. Vliv vlhkosti byl eliminován měřením za přítomnosti dusíku. Dalším vlivem je fotovodivost zkoumaných látek. Z předešlých odstavců vyplývá, že je lepší měřit za světla, protože při kontaktování je nutné osvětlení, ovšem při vypnutí světla dochází k pomalému snižování koncentrace volných nosičů náboje v čase a ovlivnění výsledku měření za tmy.

Dalším zkoumáním byl zjištěn vliv rychlosti měření (napětového i časového kroku) a používání časové kompenzace. Stabilní výstupní charakteristiky byly měřeny za osvětlení a s použitím časové kompenzace při přeskočení mezi jednotlivými křivkami při rychlosti 1 V/s. Měření převodních charakteristik vykazují také závislosti na napětovém kroku. Při přeložení bodů z výstupní do převodní charakteristiky bylo zjištěno, že se shodují s měřením napětového kroku 0,1 V/s (za osvětlení). Za těchto podmínek byly následně měřeny výstupní a převodní charakteristiky pro následující vzorky. Pro kontrolu byly u vzorku U04 odměřeny i pohyblivosti za různých podmínek. K výpočtu pohyblivosti nosičů náboje byl použit vzorec (1) v odstavci 2.2.3.2.

4.5.1 U04

V následujícím Obr. 39 jsou porovnány pohyblivosti nosičů náboje, při měření převodní charakteristiky s napětovým krokem 1 V za 1 sekundu za různých podmínek.



Obr. 39 Pohyblivosti nosičů látky U04 za různých podmínek.

Z porovnání jednotlivých pohyblivostí lze soudit, že při rychlejší měření jsou patrnější rozdíly použitých podmínek. Jednotlivé pohyblivosti, které jsou vyšší oproti trendu stejného

měření, například, že pohyblivost u FETu 20b (číslo značí vzdálenost mezi elektrodami, písmeno pořadí) je za tmy vyšší, než za světla, nebo u FETu 10c je pohyblivost na vzduchu vyšší než pod dusíkem, jsou způsobené nedůsledným dodržováním konstantních podmínek pro jednotlivá měření. I tak lze pozorovat větší rozdíly v pohyblivosti pro FETy se vzdáleností elektrod 2,5 a 20 μm , jejichž rozdíl je až jeden řád.

Převodní charakteristiky byly následně odměřeny rychlostí 0,1 V/s za osvětlení diod a pod dusíkem. Vypočtené pohyblivosti z tohoto měření jsou uvedeny v Tabulce 15. Jak už bylo v předešlých kapitolách zmiňováno, látka U04 je fotovodivá a jedná se o p-typ organického polovodiče. Charakteristiky pro výstupní a převodní charakteristiky této látky lze opět najít v předešlých kapitolách. Vezmeme-li v úvahu obě měření pohyblivosti nosičů náboje, tak má vzorek U04 pohyblivost v řádu $10^{-6} \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Menší rozptýl hodnot pohyblivosti vykazuje měření při rychlosti 0,1 V/s oproti 1 V/s. Při měření pohyblivosti lze už podle jednotek protékajících proudů předem odhadnout, v jakém řádu se bude pohyblivost vyskytovat. Respektive, směrnice přímky udává nejen její strmost, ale i mocnitel, který odpovídá protékajícím proudům I_{sd} .

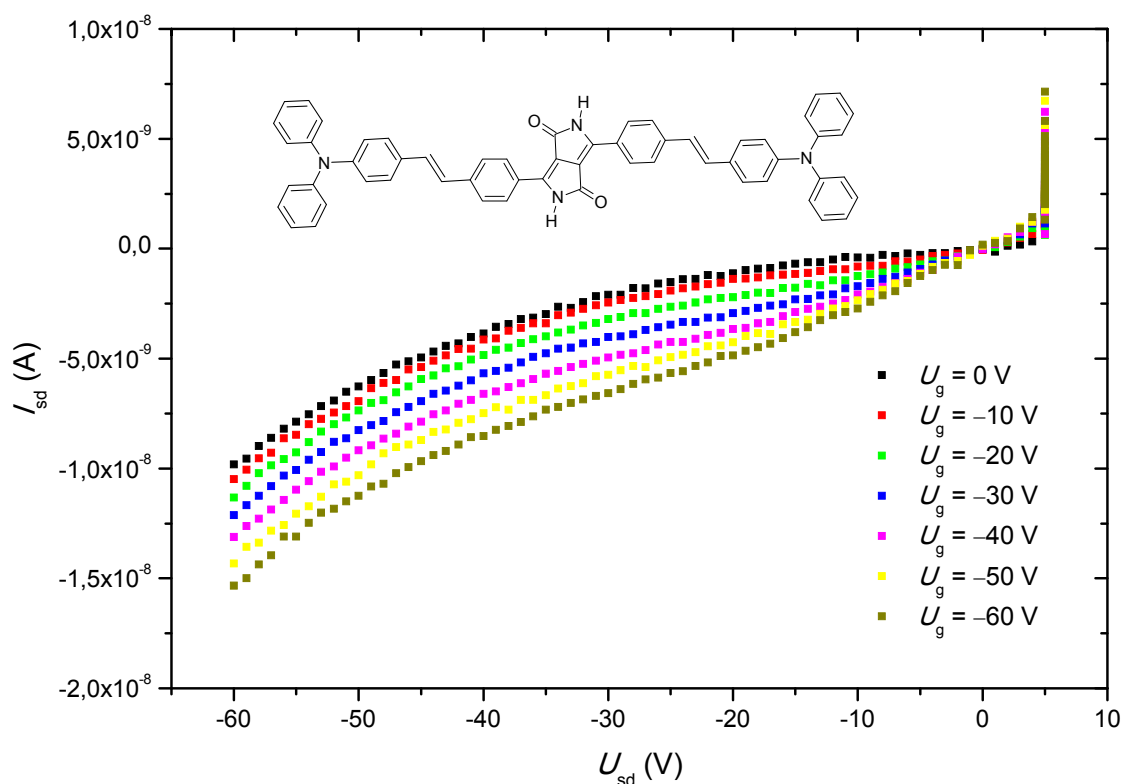
Tabulka 15 Naměřené pohyblivosti pro vzorek U04 za rychlosti 0,1 V za sekundu.

| Délka kanálu. | Označení FETu. | Naměřená pohyblivost (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹). | Průměrná pohyblivost kanálu (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹). | Průměrná pohyblivost materiálu (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹). |
|---------------|----------------|--|---|--|
| 20 μm | A | 5,19·10 ⁻⁶ | (4,44 ± 0,56)·10 ⁻⁶ | (2,20 ± 1,24)·10 ⁻⁶ |
| | B | 4,30·10 ⁻⁶ | | |
| | C | Nefunkční | | |
| | D | 3,82·10 ⁻⁶ | | |
| 10 μm | A | 2,50·10 ⁻⁶ | (2,20 ± 0,29)·10 ⁻⁶ | |
| | B | 1,93·10 ⁻⁶ | | |
| | C | 1,87·10 ⁻⁶ | | |
| | D | 2,48·10 ⁻⁶ | | |
| 5 μm | A | 1,99·10 ⁻⁶ | (1,67 ± 0,24)·10 ⁻⁶ | |
| | B | 1,44·10 ⁻⁶ | | |
| | C | 1,44·10 ⁻⁶ | | |
| | D | 1,81·10 ⁻⁶ | | |
| 2,5 μm | A | 1,31·10 ⁻⁶ | (1,05 ± 0,24)·10 ⁻⁶ | |
| | B | 7,50·10 ⁻⁷ | | |
| | C | 8,79·10 ⁻⁷ | | |
| | D | 1,28·10 ⁻⁶ | | |

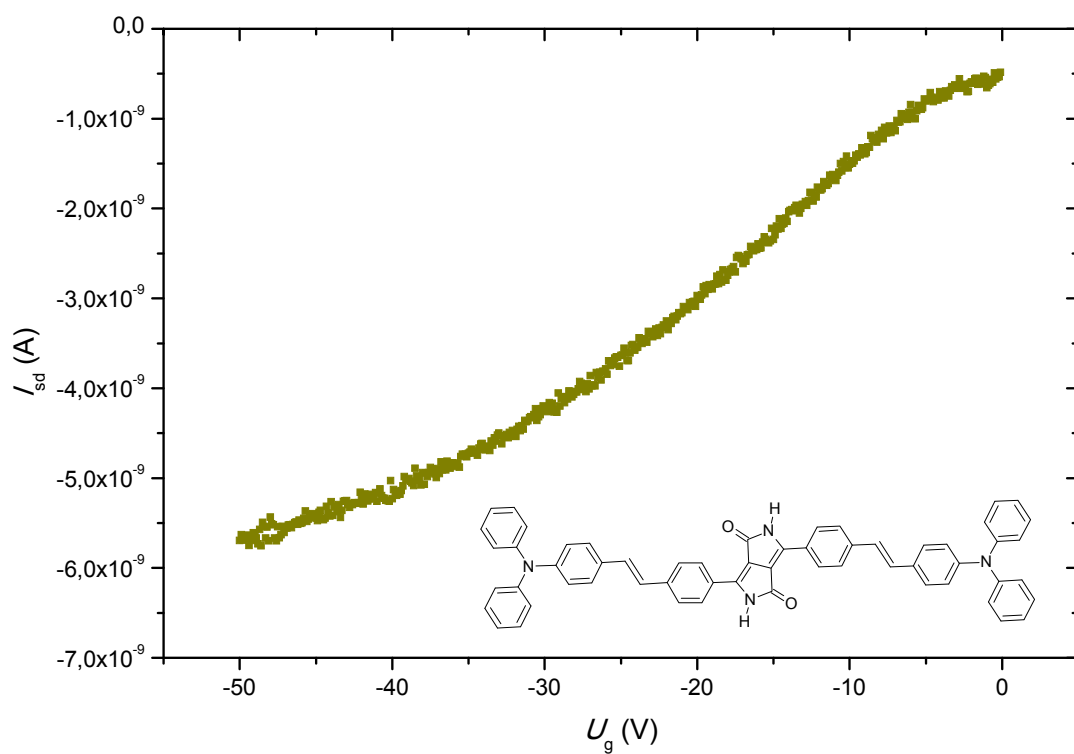
Maximální rozdíl pohyblivostí u těchto podmínek měření je půl řádu. I když výsledná pohyblivost vyšla s poměrně velkou odchylkou, je měření stabilnější. Odchyly jsou pravděpodobně způsobeny uspořádáním molekul vzorku. Problém může nastat nejen při špatném uspořádání molekul, ale i při měření vzorků s velmi nízkými proudy do 2 nA, kdy sebemenší změna podmínek může celkem razantně zvýšit odchylku jednotlivých pohyblivostí.

4.5.2 U68

Vzorek U68 vykazuje nižší proudy výstupní i převodní charakteristiky (Obr. 40 a Obr. 41). Tento vzorek také vykazuje fotovodivé vlastnosti. I přes to byly charakteristiky měřeny za osvětlení diod a pod dusíkem. Na obrázku výstupní charakteristiky, jde vidět kompenzaci v podobě svislé čáry okolo 5 V. Již první křivka ($U_g = 0$ V) je zakřivená vlivem diodové charakteristiky a následně se to promítá i do dalších křivek, které jsou touto charakteristikou zdeformovány. Problém u tohoto typu křivek je s určením lineární oblasti nárůstů, kdy není patrná oblast saturace. Při bližším zhlédnutí křivek je vidět lineární nárůst proudu přibližně do $U_{sd} = -10$ V a při tomto napětí byla odměřena převodní charakteristika.



Obr. 40 Výstupní charakteristika vzorku U68



Obr. 41 Převodní charakteristika vzorku U68

Výsledné pohyblivosti jdou vidět v Tabulka 16. U těchto pohyblivostí jsou odchylky jednotlivých pohyblivostí mnohem menší.

Tabulka 16 Výsledné pohyblivosti nosičů náboje pro vzorek U68 rychlostí $0,1 \text{ V/s}$.

| Délka kanálu. | Označení FETu. | Naměřená pohyblivost ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$). | Průměrná pohyblivost kanálu ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$). | Průměrná pohyblivost materiálu ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$). |
|-------------------|----------------|---|--|---|
| 20 μm | A | $1,86 \cdot 10^{-7}$ | $(1,91 \pm 0,12) \cdot 10^{-7}$ | $(1,59 \pm 0,31) \cdot 10^{-7}$ |
| | B | $1,89 \cdot 10^{-7}$ | | |
| | C | $1,77 \cdot 10^{-7}$ | | |
| | D | $2,10 \cdot 10^{-7}$ | | |
| 10 μm | A | $1,93 \cdot 10^{-7}$ | $(1,80 \pm 0,08) \cdot 10^{-7}$ | |
| | B | $1,80 \cdot 10^{-7}$ | | |
| | C | $1,75 \cdot 10^{-7}$ | | |
| | D | $1,71 \cdot 10^{-7}$ | | |
| 5 μm | A | $1,34 \cdot 10^{-7}$ | $(1,47 \pm 0,11) \cdot 10^{-7}$ | |
| | B | $1,49 \cdot 10^{-7}$ | | |
| | C | $1,40 \cdot 10^{-7}$ | | |
| | D | $1,63 \cdot 10^{-7}$ | | |
| 2,5 μm | A | $1,10 \cdot 10^{-7}$ | $(1,17 \pm 0,10) \cdot 10^{-7}$ | |
| | B | $1,25 \cdot 10^{-7}$ | | |
| | C | $1,05 \cdot 10^{-7}$ | | |
| | D | $1,29 \cdot 10^{-7}$ | | |

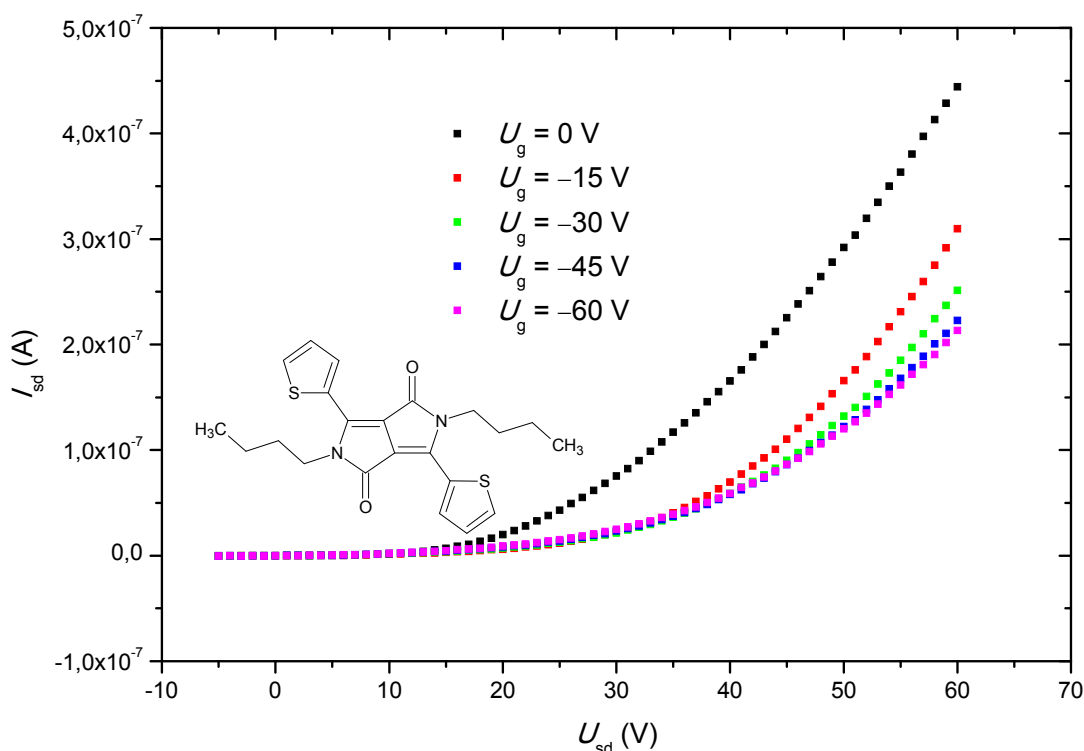
Lze předpokládat, že pokud tedy budou podmínky měření striktně dodržovány a budou konstantní v průběhu celého měření (osvit, dusík, rychlost měření) je možné snížit odchylky naměřených pohyblivostí. Potom výraznější odchylky pohyblivostí budou naznačovat závislosti spojené přímo s polovodivým materiálem (morfologie, tvorba krystalů ...)

4.5.3 U80

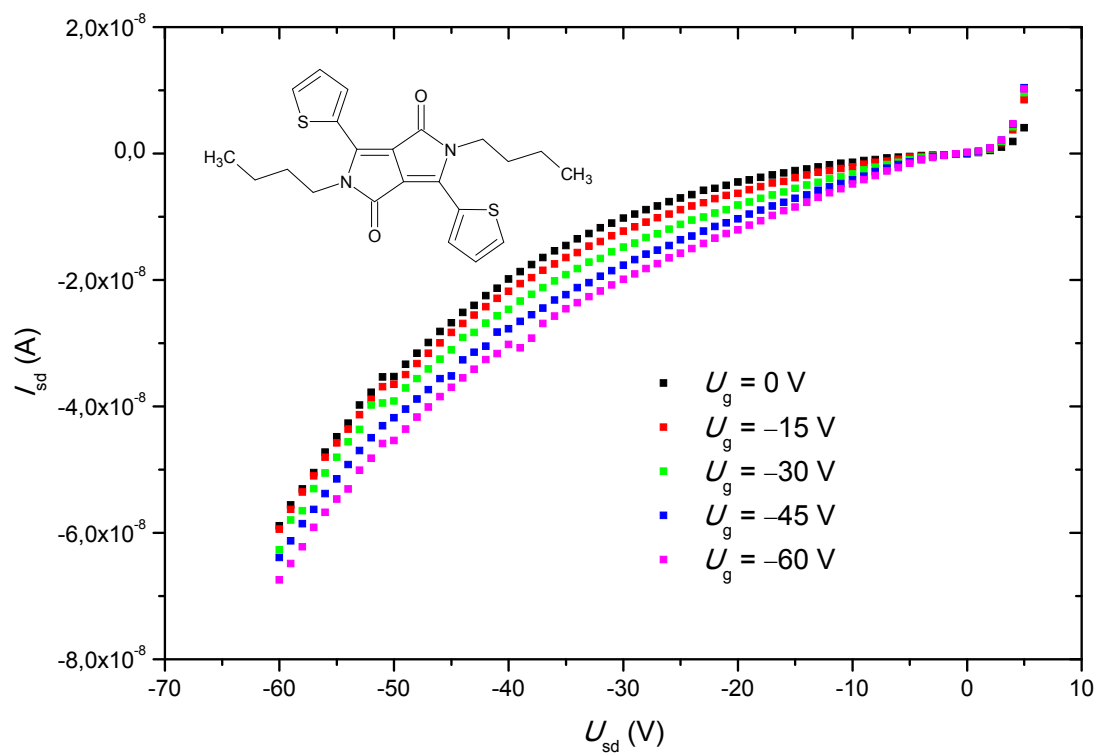
Tento vzorek vykazuje bipolární chování. To znamená, že při kladném napětí má výraznou diodovou charakteristiku (Obr. 42) a při záporném napětí U_{sd} , vykazuje vzorek FETovou výstupní charakteristiku (Obr. 43). Navíc je tento vzorek také fotovodivý. Byla tedy u tohoto vzorku odměřena pouze děrová pohyblivost (pro záporné U_{sd}) při rychlosti 1 V/s (0) za osvětlení a pod dusíkem a následně i rychlostí 0,1 V/s.

Charakteristika na obrázku 42 vykazuje závislost na přiloženém napětí U_g , ovšem nejedná se o FETovou charakteristiku. Při porovnání Obr. 42 a Obr. 43 zjistíme, že proudy v kladné oblasti U_{sd} , jsou mnohonásobně vyšší, proto lze předpokládat, že pohyblivost elektronů bude vyšší než děr. Tvzení by se mohlo potvrdit jinou technikou měření pohyblivosti nosičů náboje například metodou time-of-flight.

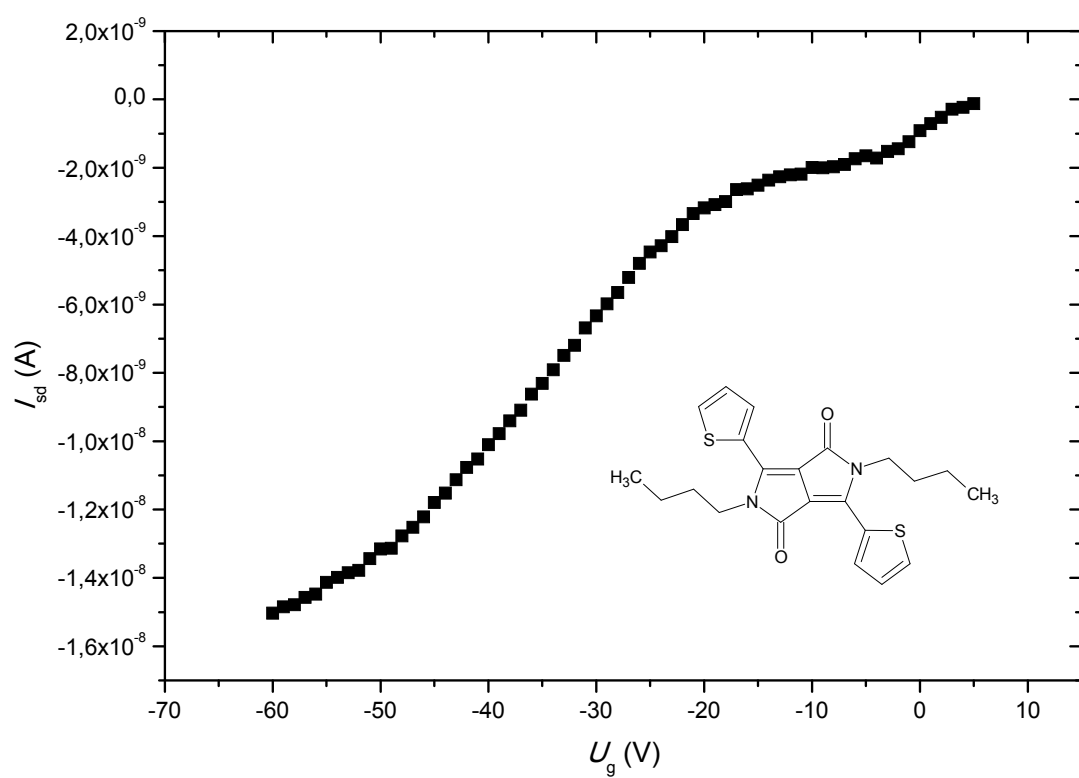
Výstupní FETová charakteristika je také zkrešlena diodovou charakteristikou. Oblast lineárního nárůstu proudu lze pozorovat do -12 V. Převodní charakteristiky pro zjištění pohyblivosti byly odměřeny při $U_{sd} = -10$ V (Obr. 44).



Obr. 42 Výstupní diodová charakteristika vzorku U80



Obr. 43 Výstupní FETová charakteristika vzorku U80

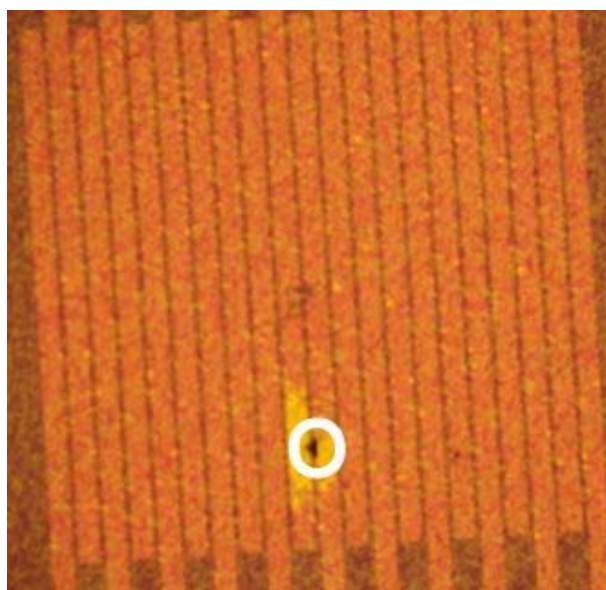


Obr. 44 Převodní charakteristika vzorku U80 rychlostí 1V/s.

Tabulka 17 Pohyblivosti nosičů vzorku U80 s rychlostí IV/s.

| Délka kanálu. | Označení FETu. | Naměřená pohyblivost (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹). | Průměrná pohyblivost kanálu (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹). | Průměrná pohyblivost materiálu (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹). |
|---------------|----------------|--|---|--|
| 20 μm | A | 3,03·10 ⁻⁷ | (3,01 ± 0,41)·10 ⁻⁷ | (3,80 ± 1,16)·10 ⁻⁷ |
| | B | 2,34·10 ⁻⁷ | | |
| | C | 3,12·10 ⁻⁷ | | |
| | D | 3,52·10 ⁻⁷ | | |
| 10 μm | A | 3,23·10 ⁻⁷ | (2,90 ± 0,30)·10 ⁻⁷ | |
| | B | 3,17·10 ⁻⁷ | | |
| | C | 2,70·10 ⁻⁷ | | |
| | D | 2,52·10 ⁻⁷ | | |
| 5 μm | A | 5,55·10 ⁻⁷ | (4,82 ± 1,47)·10 ⁻⁶ | |
| | B | 6,13·10 ⁻⁷ | | |
| | C | 2,77·10 ⁻⁷ | | |
| | D | *5,04·10 ⁻⁶ | | |
| 2,5 μm | A | 5,43·10 ⁻⁷ | (4,73 ± 0,65)·10 ⁻⁶ | |
| | B | 5,33·10 ⁻⁷ | | |
| | C | 4,15·10 ⁻⁷ | | |
| | D | 4,01·10 ⁻⁷ | | |

Při prvním měření tohoto vzorku, byla na jednom FETu odměřena charakteristika s výrazně odlišnou (větší) pohyblivostí (značen „*“ a nebyl používán pro další výpočty). Proto byl tento FET vyfocen pod mikroskopem (Obr. 45). Na FETu je přítomen úkaz, který je umístěn přesně mezi elektrodami a zvyšuje procházející proud tedy i pohyblivost nosičů náboje. Vzdálenost elektrod je u tohoto FETu 5 μm a velikost tohoto úkazu lze odhadovat na přibližně stejnou.



Obr. 45 Fotografie FETu se zvýšenou pohyblivostí.

Při pozorování tohoto vzorku pod mikroskopem byly podobné úkazy po celém substrátu, ovšem ne přesně mezi elektrodami. Jelikož patří vzorek U80 mezi rozpustné formy, může být úkaz krystal vzorku. Tomu by nasvědčovalo i okolí krystalku, kde by došlo k rekrystalizaci z napařeného substrátu a tedy i zmenšení vrstvy v okolí tohoto vzorku (žluté zabarvení). Pokud by byly odečteny průměrné pohyblivosti pro FETy se stejnou vzdáleností elektrod a následně přepočtená pohyblivost (odhadem šířka a vzdálenost) jen pro tento úkaz (krystalek), vykazoval by mnohonásobně vyšší pohyblivost.

Při druhém měření převodních charakteristik (0,1 V za sekundu) došlo u FETu označeného „*“ k průrazu a vzorek začal vykazovat charakteristiky s nižšími proudy jako ostatní FETy. Výsledné pohyblivosti pro toto měření je v Tabulka 18.

Tabulka 18 Pohyblivost nosičů vzorku U80 za rychlosti 0,1V/s.

| Délka kanálu. | Označení FETu. | Naměřená pohyblivost (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹). | Průměrná pohyblivost kanálu (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹). | Průměrná pohyblivost materiálu (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹). |
|---------------|----------------|--|---|--|
| 20 μm | A | 5,457·10 ⁻⁸ | (5,33 ± 0,37)·10 ⁻⁸ | (8,44 ± 2,31)·10 ⁻⁸ |
| | B | 4,817·10 ⁻⁸ | | |
| | C | 5,217·10 ⁻⁸ | | |
| | D | 5,829·10 ⁻⁸ | | |
| 10 μm | A | 6,857·10 ⁻⁸ | (9,13 ± 1,67)·10 ⁻⁸ | |
| | B | 8,743·10 ⁻⁸ | | |
| | C | 9,371·10 ⁻⁸ | | |
| | D | 1,154·10 ⁻⁷ | | |
| 5 μm | A | 7,371·10 ⁻⁸ | (8,34 ± 1,25)·10 ⁻⁸ | |
| | B | 8,657·10 ⁻⁸ | | |
| | C | 7,171·10 ⁻⁸ | | |
| | D | *1,031·10 ⁻⁷ | | |
| 2,5 μm | A | 1,171·10 ⁻⁷ | (1,09 ± 0,08)·10 ⁻⁷ | |
| | B | 9,571·10 ⁻⁸ | | |
| | C | 1,136·10 ⁻⁷ | | |
| | D | 1,100·10 ⁻⁷ | | |

Ačkoliv byly u tohoto měření důsledně dodržovány pravidla a podmínky měření, výsledná průměrná pohyblivost, má celkem velkou odchylku. To může být způsobeno přítomností úkazů na vzorku, které nelze na první pohled vidět standardním optickým mikroskopem.

5 ZÁVĚR

V této diplomové práci je popsána problematika organických polovodičů na bázi DPP a to především s ohledem na charakterizaci pohyblivosti nosičů náboje. Pohyblivost nosičů, lze určit několika způsoby a jedním z nich je určení pohyblivosti z voltampérových charakteristik OFET tranzistorů. Na Fakultě Chemické VUT v Brně byla sestavena aparatura pro měření voltampérových charakteristik FET struktur. Z derivátů DPP byly připraveny tranzistory na komerčně dostupném FETovém substrátu.

Dílčím úkolem práce bylo vytvořit uživatelské rozhraní pro automatický sběr měřených dat z dostupného měřicího systému. Aparatura pro měření charakteristik sestává z několika dílčích hardwarových komponent. Pro měření voltampérových charakteristik bylo zapotřebí propojit tyto komponenty s osobním počítačem a vytvořit program pro jejich ovládání. Pomocí grafického programovacího jazyku LabVIEW vznikl algoritmus „MeasFET“. Tímto algoritmem je možné manuálně i poloautomaticky ovládat jednotlivé komponenty aparatury a snahou bylo vytvořit software, který nejvíce vyhovuje uživatelským potřebám. Lze tak měřit nejen výstupní a převodní charakteristiky organických FET tranzistorů, ale i další elektrické odezvy organických materiálů například v závislosti na teplotě měřeného vzorku.

Prvotní měření na této aparatuře se zabývají nastavením parametrů k odměření výstupní a převodní charakteristiky. Tyto prvotní zkoušky byly prováděny na látce DPP jinak označované jako vzorek U04. Tento vzorek byl zkoumán z hlediska nejen nastavení parametrů měření, ale také z hlediska nepřímých vlivů na měření výstupní a převodní charakteristiky.

U nastavení parametrů byl především zkoumán vliv rychlosti změny napětí při měření výstupní a převodní charakteristiky na jejich získaný průběh. Výsledkem tohoto zkoumání je, že výstupní charakteristiky lze měřit rychlostí změny U_{sd} v čase při 1 V/s, ale s použitím časové kompenzace při změně U_g a s počátkem křivek v $U_{sd} = 0$ V. Časová kompenzace umožňuje čekat mezi měřeními jednotlivých křivek výstupní charakteristiky, případně může být využita pro zkoumání časové odezvy vzorků. Převodní charakteristiky jsou poměrně hodně zatíženy dynamikou měření, respektive rychlostí změn napětí. Porovnáním výstupní a převodní charakteristiky bylo zjištěno, že ideální měření převodní charakteristiky je rychlostí změny napětí U_g v čase při 0,1 V/s s počátkem 0 V.

Byly také zkoumány nepřímé vlivy, jako jsou vzdušná vlhkost nebo osvětlení vzorku a to především kvůli reprodukovatelnosti měření. Vlhkost absorbována na povrchu vzorku zvyšuje procházející proud mezi S a D elektrodou. Dochází tak ke zkreslování hodnot jednotlivých proudů I_{sd} a tento problém byl vyřešen měřením pod dusíkovou atmosférou. Osvětlení laboratoře, a tím i vzorku, má také podstatný vliv na měření. Jelikož bylo prokázáno, že měřené vzorky jsou fotovodivé, nastal problém, zda měřit za světla, nebo za tmy. Při kontaktování jednotlivých FETů je nutné použít osvětlení, proto při následném vypnutí světel zůstávají ve vzorku excitony právě generované světlem. Poté při měření za tmy dochází ke snižování koncentrace těchto excitonů a tedy i k získání odlišných charakteristik pro identické měření.

K dalším přímým či nepřímým vlivům patří charakteristika zkratovaného FETu vzorku U64. K proražení izolační vrstvy SiO_2 došlo už před nanášením organické vrstvy. Tyto charakteristiky jsou ovlivněny spodním n-dopovaným křemíkem substrátu a také přiloženým napětím na G elektrodu. To může mít vliv na naměřené hodnoty při měření látek s vysokou

pohyblivosti nosičů náboje, při kterém by vznikl vodivý kanál právě mezi tímto zkratovaným FETem a okolními měřenými FETy.

Pro určení pohyblivosti nosičů náboje byly následně měřeny převodní charakteristiky za konstantního osvětlení diod, pod dusíkem a převážně s rychlostí změny U_g 0,1 V/s. Pro porovnání byly měřeny charakteristiky i rychlostí 1 V/s. Tyto měření byly prováděny pro vzorky U04, U68 a U80. U vzorku U04 byly navíc porovnány pohyblivosti za různých podmínek, ale při rychlosti změny U_g 1 V/s. Při tomto měření jsou patrné velmi malé odlišnosti v rámci podmínek měření (vlhkost a osvětlení). Při měření rychlostí 0,1 V/s byla vypočítána průměrná pohyblivost děr vzorku U04 na $(2,20 \pm 1,24) \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Při porovnání hodnot pohyblivosti děr za obou rychlostí bylo zjištěno, že pohyblivost se pohybuje v řádu 10^{-6} pro tento vzorek.

Výstupní charakteristiky vzorku U68 jsou zkresleny diodovou charakteristikou. U těchto charakteristik nedochází k saturaci, nicméně lze určit ohmickou oblast lineárního nárůstu proudu. Převodní charakteristiky byly tedy odměřeny pro ohmickou oblast rychlosti změny U_g 0,1 V/s. Výsledná pohyblivost děr tohoto vzorku je $(1,59 \pm 0,31) \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{Vs}$.

Vzorek U80 vykazuje bipolární chování výstupní charakteristiky. Pro kladné napětí U_{sd} má diodovou charakteristiku s poměrně vysokými proudy okolo 450 nA, kdežto pro záporné U_{sd} má FETovou charakteristiku s proudy okolo 60 nA, Z toho je patrné, že dochází k přenosu náboje nejen děrami, ale i elektrony, ovšem v kladné oblasti U_{sd} nevykazuje FETovou charakteristiku. Výstupní charakteristika děrové vodivosti je také zkreslena diodovou charakteristikou a nedochází k saturaci. U tohoto vzorku se vyskytla anomálie na jednom z 16-ti FETů. Tento FET vykazoval omnoho vyšší proudy, tedy i pohyblivost děr. FET byl vyfocen optickým mikroskopem a bylo zjištěno přítomnosti útvaru přesně mezi hřebenovými elektrodami. Jelikož se jedná o rozpustnou formu derivátu DPP, mohlo by to nasvědčovat přítomnosti krystalického útvaru této látky. Pohyblivost děr při měření převodní charakteristiky 0,1 V/s byla vypočítána na $(8,44 \pm 2,31) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{Vs}$.

6 POUŽITÉ ZKRATKY A SYMBOLY

| | |
|------------------|---|
| FET | Field effect tranzistor – polovodičová součástka |
| MeasFET | Program pro měření voltampérových charakteristik FETů |
| LabVIEW | Grafický programovací jazyk |
| DPP, U04 | organická látka 3,6-diphenyl-2,5-dihydropyrrolo[3,4-c]pyrrole 1,4-dione |
| OFET | organický FET tranzistor |
| U68, U80 | deriváty DPP |
| UV | ultra violet – ultrafialové spektrum |
| VIS | viditelné spektrum světla |
| HOMO | highest occupied molecular orbital – nejvyšší obsazený molekulový orbital |
| LUMO | lowest unoccupied molecular orbital – nejnižší obsazený molekulový Orbital |
| TOF | time-of-flight – metoda určování pohyblivosti nosičů náboje |
| TF-SCLC | trap-free space-charge limited current |
| CELIV | Charge extraction by linearly increasing voltage |
| CEPV | Carrier extraction by pulsed voltage |
| S, D a G | source, drain, gate (elektrody) |
| JFET | junction FET |
| IGFET | insulation gate FET (MOSFET) |
| TFT | thin film tranzistor |
| U_{sd}, V_{DS} | elektrické napětí mezi S a D elektrodou |
| U_g, V_G | napětí na G elektrodě |
| I_{ds} | proud procházející mezi S a D elektrodou |
| PID | regulační konstanty proporcionálně-integračně-derivačního regulátoru |
| GPIB | hardwarové sběrnice, komunikační rozhraní |
| RS232 | sériový komunikační port |
| PC | personal computer |

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- 1** PROKEŠ, Jan, Stanislav NEŠPŮREK a Jaroslav STEJSKAL. Vodivé polymery: Inteligentní materiály pro nové století. *Vesmír*. 2001, č. 80. Dostupné z: <http://www.vesmir.cz/clanky/clanek/id/5505>
- 2** SOLANKI, Arkur, Ashis GUPTA, IYER a GARG. Photovoltaiceffectinarylenevinylene-co-pyrrolenevinylene(AVPV). *ScienceDirect: Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2008, roč. 2009, č. 2, s. 4. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024808003139>
- 3** PFLEGER, Jiří. Polymerní nanostruktury v optoelektronice. In: *Výuková přednáška pro učitele středních škol o využití polymerů v optoelektronice: fyzikální principy, příklady aplikací*. Praha: Akademie věd České republiky, 2007, s. 12. ISBN 80-86675-08-4. Dostupné z: <http://archiv.otevrena-veda.cz/users/Image/default/C1Kurzy/NH2006pdf/12.pdf>
- 4** SO, Franky. *Organic electronics: Materials, Processing, Devices and Applications*. Boca Raton, 2010. ISBN 978-1-4200-7290-7.
- 5** NEŠPŮREK, Stanislav a Miloš MATYÁŠ. Elektroaktivní organické materiály. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*. 2006, roč. 51, č. 1, s. 21. Dostupné z: http://dspace.dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/141298/PokrokyMFA_51-2006-1_5.pdf
- 6** CHEN, L. L., W. L. LI, H. Z. WEI, B. CHU a B. LI. Organicultravioletphotovoltaic diodes based on copper phthalocyanine as an electron acceptor. *ScienceDirect: Solar Energy Materials and Solar Cells* [online]. 2006, č. 12, s. 9 [cit. 2012-03-26]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024805003521>
- 7** PRACHAŘ, Jan. *Model těsné vazby a jeho aplikace na molekulární elektroniku a transport v mezoskopických systémech*. Praha, 2002. Bakalářská práce. Univerzita Karlova. Vedoucí práce RNDr. Martin Čížek, Ph.D.
- 8** LUQUE, Antonio a Steven HEGEDUS. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* [online]. John Wiley & Sons, 2003 [cit. 2012-03-26]. ISBN 978-1-59124-774-6 Dostupné z: http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=1081&VerticalID=0
- 9** SVOBODA, Jiří. *Organická chemie I*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. 291 s. ISBN 80-708-0561-7. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-561-7/pages-img/. Skripta. VŠCHT Praha.
- 10** KLÁN, Petr. *Organická fotochemie*. Brno: Masarykova univerzita, 2001. ISBN 80-210-2526-3.
- 11** LYANG, W Y. Excitons. In: *IOPSCIENCE: Physics Education* [online]. 1970 [cit. 2012-03-26]. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/0031-9120/5/4/003/>

-
- 12** DYAKONOV, V. a E. FRANKEVICH. On the role played by polaron pairs in photophysical processes in semiconducting polymers. *ScienceDirect: Chemical Physics* [online]. 1997, 1-2, s. 15 [cit. 2012-03-26]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301010497003054>
- 13** ŘIHÁK, Pavel. *Základní vlastnosti polovodičových materiálů*. Brno, 2010. Bakalářská práce. FEKT VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Jiří Špinka.
- 14** KLÍMEK, Adolf, Josef ZÍKA. *Malá encyklopedie elektrotechniky: Polovodičové součástky a mikroelektronické struktury*. 2. přepr.dopl.vyd. Praha: SNTL, 1989, 455 s.
- 15** ANSELM, A. *Úvod do teorie polovodičů*. 1. vyd. Praha: Academia, 1967, 398 s.
- 16** BENDA, V. a V. PAPEŽ. *Komponenty výkonové elektrotechniky*. Praha, 2006. Skripta. ČVUT.
- 17** KAZELLE, Jiří. *Výrobní procesy*. Brno, 1988. Skripta. FEKT VUT v Brně.
- 18** Charge mobility measurement techniques in organic semiconductors. *Springerlink: Optical and Quantum Electronics* [online]. 2008, č. 2, s. 21 [cit. 2012-02-24]. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/content/77n555033k56834m/fulltext.pdf>
- 19** Tranzistory řízené elektrickým polem. *RS components* [online]. 22.5.2005 [cit. 2012-02-24]. Dostupné z: http://z-moravec.net/ext_el/tranz/fet.php
- 20** First laborator transistor. *Scribd* [online]. 1930, 2012 [cit. 2012-02-24]. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/48986101/1925-first-laboratory-Transistor-US-Patent-1745175>
- 21** *Elektronika: obvody, součástky, děje*. Praha: Ben, 1998. ISBN 80-86056-25-2.
- 22** FRANK, H. a V. ŠNEJDAR. *Principy a vlastnosti polovodičových součástek*. Praha: STNL, 1976.
- 23** MUSIL, Vladislav. *Elektronické součástky*. Brno, 2005. ISBN 80-214-2627-6. Skripta. FEKT VUT v Brně.
- 24** IPMS. *End-of-Line test substrates for customized Organic Semiconductors* [online]. Dresden [cit. 2012-02-24]. Dostupné z: <http://www.ipms.fraunhofer.de/content/dam/ipms/common/products/COMEDD/ofet-e.pdf>
- 25** MOORE, Donald G., Goverdhan METHA a SIEGAL. Attempted reformatkii reaction of benzonitrile, 1,4-diketo-3,6-diphenylpyrrolo[3,4-C]pyrrole. A lactam analogue of pentalene. *Tetrahedron Letters* [online]. 1974, č. 29 [cit. 2012-03-27]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040403901932022>
- 26** ZHANG, Kuan LIU, Haijun FAN, Yang LI, Xiaowei ZHAN, LI a YANG. The photovoltaic behaviors of PPV- and PPE-type conjugated polymers featured with diketopyrrolopyrrole (DPP) units. *ScienceDirect: Synthetic Metals* [online]. 2009, 19-20 [cit. 2012-03-27]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379677909003415>

-
- 27** FAULKNER a Russell J. SCHWARTZ. *High Performance Pigments*. Weinheim: Wiley-VCH, 2009. ISBN 978-3-527-31405-8.
- 28** The synthesis, absorption and fluorescence of polardiketo-pyrrolo-pyrroles. *ScienceDirect: Dyes and Pigments* [online]. 2008, č. 2 [cit. 2012-03-27]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143720808002271>
- 29** HONOVÁ, Jana. *Studium vztahu mezi strukturou a vlastnostmi derivátů diketopyrrolopyrolů*. Brno, 2011. Diplomová práce. FCH VUT v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
- 30** SURARU, Ute ZSCHIESCHANG a Frank WÜRTHNER. Diketopyrrolopyrrole as p-channel organic semiconductor for high performance OTFTs. *The Royal Society of Chemistry* [online]. 2011, č. 1 [cit. 2012-03-27]. Dostupné z: <http://www.rsc.org/suppdata/CC/C0/C0CC04395H/C0CC04395H.PDF>
- 31** QU, Sanyin, Wenjun WU, Jianli HUA, Cong KONG, LONG a He TIAN. New Diketopyrrolopyrrole (DPP) Dyes for Efficient Dye-Sensitized Solar Cells. *The Journal of Physical Chemistry C* [online]. 2009, č. 114 [cit. 2012-03-27]. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/jp909786k>
- 32** GUO, Fuling, Sanyin QU, Wenjun WU, Jing LI, Weijiang YING a Jianli HUA. Synthesis and photovoltaic performance of newdiketopyrrolopyrrole (DPP) dyes for dye-sensitized solar cells. *ScienceDirect: Synthetic Metals* [online]. 2010, č. 15 [cit. 2012-03-27]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379677910002602>
- 33** MIZUGUCHI, Jin, Tomohiko IMODA, Hiroo TAKAHASHI a H. YAMAKAMI. Polymorph of 1,4-diketo-3,6-bis-(4'-dipyridyl)-pyrrolo-[3,4-c]pyrrole and their hydrogenbond network: A material for H₂ gas sensor. *ScienceDirect: Dyes and Pigments* [online]. 2005, č. 1 [cit. 2012-03-27]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143720805000513>
- 34** IEEE-488 INTERFACE BUS. GRANITE ISLAND GROUP. *Technical Surveillance Counter Measures* [online]. Gloucester, 2010 [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: <http://www.tscm.com/ieee-488.pdf>
- 35** The National Instruments GPIB Advantage. NATIONAL INSTRUMENTS. *National Instruments: Product and services* [online]. 2011 [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/np/app/culdesac/p/ap/ictrl/lang/en/pg/1/sn/n17:ictrl,n21:25/docid/tut-4293/>
- 36** IEEE-488. MICROTON, S.R.O. *Wikipedia.infostar.cz* [online]. Luhačovice, 2. 12. 2008 [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: http://wikipedia.infostar.cz/i/ie/ieee_488.html
- 37** Automatizované měřicí systémy se sběrnici IEEE 488. USTAV ŘÍZENÍ SYSTÉMŮ A SPOLEHLIVOSTI. *Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií* [online]. Liberec, 17. 8. 2011 [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: http://www.rss.tul.cz/download/cms/03_GPIB_HW.pdf

-
- 38** GPIB. UNIVERSITY OF CALIFORNIA. *MMWG* [online]. 8. 9. 2000 [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: <http://tempest.das.ucdavis.edu/mmwave/multiplier/GPIB.html>
- 39** IEEE-488 GPIB Fundamentals. *L-com Global Connectivity* [online]. North Andover [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: <http://69.84.140.50/content/Article.aspx?Type=N>
- 40** HW server představuje - Sériová linka RS-232. *Hw.cz* [online]. 12. 12. 2005 [cit. 2012-01-05]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/rs-232>
- 41** Soubor:Rs232 oscilloscope trace.jpg. *Wikipedie, otevřená encyklopedie* [online]. 4.7.2007 [cit. 2012-01-05]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Rs232_oscilloscope_trace.jpg
- 42** Betatronics®, RS232, I232. *Betatronics®* [online]. Michigan, 2007 [cit. 2012-01-05]. Dostupné z: <http://www.beta-a2.com/i232.htm>
- 43** KEITHLEY INSTRUMENTS INC. *Model 617 Programmable Electrometer: Instruction Manual*. Cleveland, Ohio, U.S.A., 1984. Dostupné z: <http://www.keithley.com/support/data?asset=1062>
- 44** KEITHLEY INSTRUMENTS INC. *Model 6487 Picoammeter/Voltage Source: Reference Manual*. Cleveland, Ohio, U.S.A., 2002. Dostupné z: <http://www.keithley.com/data?asset=10756?asset=1062>
- 45** NEWPORT ELECTRONICS, Inc. *ISeries Monitor/Controller: Communication Manual*. U.S.A. Dostupné z: <http://www.newportus.com/Pdf/M3397CN.pdf>
- 46** VLACH, Jaroslav; HAVLÍČEK, Josef; VLACH, Martin. *Začínáme s LabVIEW*. Praha : BEN, 2008. 248 s.
- 47** The Benefits of Programming Graphically in NI LabVIEW. *National Instruments: LabVIEW* [online]. 2011 [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: <http://www.ni.com/labview/whatis/graphical-programming/>